

生存圏としての宇宙プラズマ圏の物理学と工学応用

京都大学宙空電波科学研究センター
松本 紘

宇宙というのは大変魅力のあるところで、科学的にもおもしろく、実用的にもおもしろい。まず科学面について述べます。日本が米国と一緒にになってGEOTAILという衛星を1992年に上げました。GEOTAILの軌道は図1に示します。GEOTAILは、地球の半径の210倍ぐらいの150万キロぐらいの遠くまで地球の後ろ側に飛びました。最近では地球の近くを回るように軌道変更がなされています。その成果は世界がその実績を認めました。

電波で測りますと、宇宙プラズマというのは多彩ですが、その中で二つの例を取り上げます。一つ目の話題は、ジオテイルが最初に発見したプラズマの世界の中で聞いたことのないような孤立したパルス波です。そういう新発見をしますと、世界中が騒ぎます。ヨーロッパやアメリカは

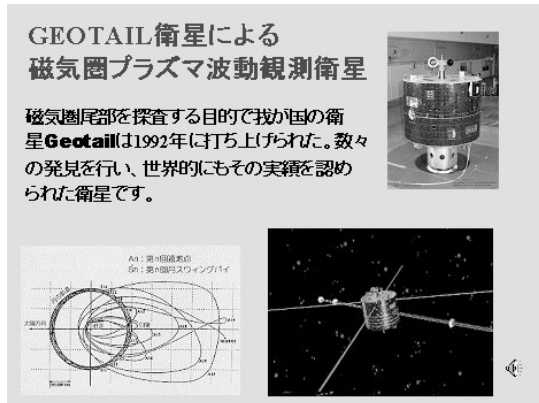


図1. GEOTAIL衛星とその軌道

次々と衛星で追実験をしています。そういった意味でジオテイルは先鞭をつけた一つの重要な衛星でした。われわれが最初にへんてこな孤立パルス波形を観測したのは太陽とは反対方向に伸びた磁気圏尾部のプラズマシートと呼ばれる領域でした。ふつう電波屋は周波数スペクトルを測ります。図2は典型的な周波数スペクトルの時間変化を表すダイナミックスペクトルと呼ばれる

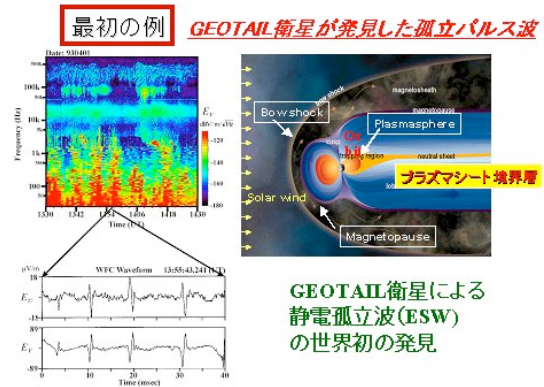


図2. GEOTAILで発見された静電孤立波

もので、周波数が縦軸で横軸が時間です。周波数帯は10ヘルツぐらいから800キロヘルツまでをカバーしています。いたるところに数ヘルツから20キロヘルツぐらいに連続して広がる強いプラズマ波がいっぱいあることがわかります。この波は広帯域静電ノイズ(BEN: Broadband Electrostatic Noise)として昔から知られていていましたが、これは何だろうということにはわかっていませんでした。

私どもはたまたまそれをスナップショットでその波形を撮って見たわけですが、すると「広帯域ノイズ」という言葉から創造されるような一定に定まらないいろんな波形が重なり合った雑音波形ではなく、この図にあるようにまるで心電図みたいな波形が見つかったのです。「これは本当かいな」と思う人はずいぶん多かったようです。いまでもそういう人はいますけれども、心電図のようなパルス波形が受かる。こういうものが自然界にあるのだろうか、最初は思ったのですが、実は本当だったのです。だから非常におもしろい物理的研究がこのジオテイルの発見によって進展したわけです。

よくわからないときにはふつう頭を使うのですが、頭では追いつかないような非線形の複雑な物理問題が多くあります。そういうときには、最近ではスーパーコンピュータを頼ります。宇宙空間で観測された電波をスーパーコンピュータで再現できるかどうかを試みるわけです。こうしますとわれわれが解析的に解けないような方程式もだいたい解けてくることになります。私は科学衛星による観測実験と平行して、「コンピュータの中に宇宙を取り込もう」というキャッチフレーズで、スーパーコンピュータの数値実験を長らくやってきました。

GEOTAIL プラズマ動乱が発見した静電孤立波 (ESW)
 — 観測とシミュレーションの比較 —

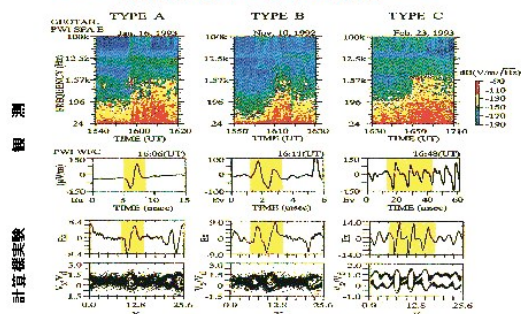


図3 GEOTAIL衛星観測波形と計算機実験の波形結果の比較

図3はGEOTAIL観測結果と計算機シミュレーション結果を比較したものです。この図の上半分がジオテイルの観測波形です。下半分は計算機実験で再現したものです。両者は非常によく似ており、ほとんど一致しています。こういうものが計算機実験で再現できるということは、物理過程が理解できるということです。

電子ビームがプラズマ中を走ると 時間経過とともに、不安定になって、波状に変形し、そのうちに団子状の渦巻きが電子の位相空間で形成されます。電子の渦ですね。この渦と渦は見てもらったらわかるとおり、近接してくると二つが合体します。

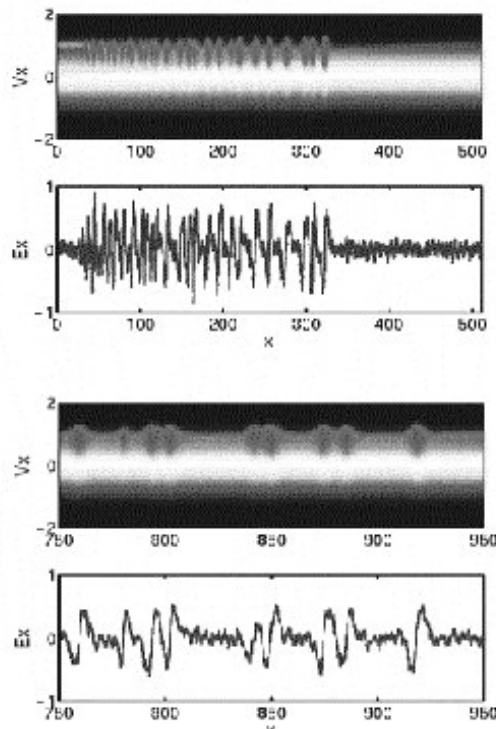


図4. 電子ビーム不安定の非線形発展

物理の世界では孤立波、ソリトンというのが知られていますが、二つのソリトンは衝突してもすり抜けるのですが、この電子の渦同志はすり抜けません。合体したらそのまま、強いやつが弱いやつを飲み込んでしまいます。つまり、弱肉強食になっているんですね。それにしたがって作られる電界の波形を見るといい。まさに孤立したパルス波形になるのです。

図3に示す絵だけ見ますと似ているということしかわかりませんが、スーパーコンピュータで解きますと、その中のメモリーに詳細な物理過程の情報が全部入っています。人工衛星で測りますとデータも限られていますから、すべての物理情報はなかなかわかりません。そこでスーパーコンピュータの計算機実験データが大いに役立つのです。ジオテイルのパルス波形の発見とそれを電子の泡、もう少し学術的に言いますとBGKソリトンでうまく説明できるという計算機実験の結果を合わせて国際舞台で発表したものですから、諸外国の研究者たちは「目からウロコ」と非常に新鮮な驚きを示しました。

スーパーコンピュータでどんなことができるかという二つ目の例をお話します。太陽風が磁気圏にぶつかりますと磁気圏の太陽側の前面に「バウショック」というショ

ックが作られます。地球は太陽風が猛烈な勢いで走っている川の中のモーターボートみたいなものですから、船先にショックができるのです。それがバウショック、船先のショックです。ジオテイルはこのバウショックを何回もよぎっています。モーターボートの船先周辺の水面というのはすごく荒れているでしょう。同じように地球の前面のショック付近でもプラズマがいっぱい荒れています。そこを衛星が通過しますと、非常に奇妙な波がいっぱい受信されます。それも一瞬のうちにいろいろ変化します。それを頭と簡単な理論で理解することはほとんど不可能です。そこで、コンピュータ実験が役立つのです。

図5はたとえば先ほどから何回も出ていますプラズマ波動のダイナミックスペクトル図です。真っ赤になった強い波動が突然に現れ、また突然に消えます。それが繰り返されていますね。バウショックのところを通過するたびに、こんなふうに多彩で強い波が出ます。この時間スケールでは衛星は実質的にほとんど空間的にじっとしているはずなのに、次々とショックに衛星が遭遇するのは、このショックの前面が前後に動いているからなんですね。太陽風はそんなにゆったりと静かに流れている大河ではありません。猛烈に変動している激流みたいなもので、ショックの位置は絶えず変動しているのです。

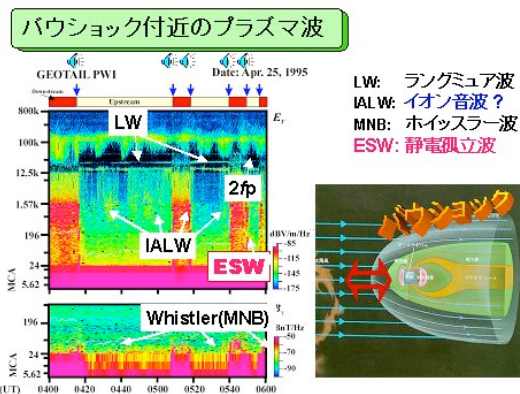


図5 GEOTAILが観測したバウショック近傍のプラズマ波動のスペクトル

観測してみますとショック付近で観測されるプラズマ波の波形は、千分の1秒（ミリ秒）で非常に早く変動しています。この図の横軸はたったの20ミリ秒です。連続波形が受かっているかと思うと、突然に先ほどのようなパルス波形が受かります。その間、たったの50分の1秒です。

実に高速に変化します。これはプラズマの素過程そのもので、磁気圏物理学を研究する上で非常に重要な問題なわけです。太陽風と磁気圏のせめぎあいの際、衝突のほとんどない状態で運動量を交換する役割はプラズマ波が担うからです。つまりバウショックの周辺で起こるミクロな物理現象を解析し、観測結果を説明するモデルを構築することがこの場合のシミュレーションの役割です。

図6はバウショック付近の波動励起のシミュレーション結果を動画にしたものです。先ほどの絵とは左右逆さまで、右側に太陽があり、太陽風は右側から吹き込んでいます。その結果、順次ショックの上流側、遷移領域、下流側が形成されます。上流側から太陽風プラズマとして電子とイオンが同じ速度で走ってきますが、バウショックの遷移領域で一部のイオンが上流側にはね返されます。一方、電子は逆に下流側に向けて加速を受け、遷移領域で速度が早くなります。そして下流側に到着した電子群は突然に速度空間で広がりを見せます。これは電子が熱くなることを意味しています。

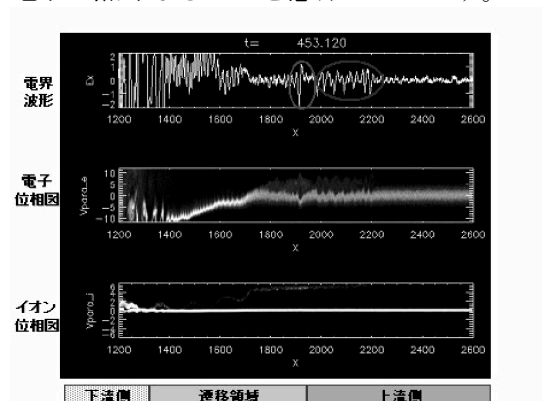


図6 バウショック付近の波動励起のシミュレーション

ここで、波動の電界成分を表す一番上のパネルを見てほしいのですが、電界成分は時間的に非常に早く変化しています。計算機実験の結果をアニメーションで見ると一瞬先ほどのパルス波形が出てきます。そしてすぐに消え去って連続波形に変わってしまいます。鴨長明の「方丈記」の泡沫（うたかた）のようなもので、流れに浮かぶ泡沫はかつ消え、かつ結び……というわけですね。一瞬のうちに次々に波形が変化する過渡現象が起こります。電界の波形変化と電子ビームの変化とを注意深く見ると電子ビームの渦巻きが大きくなった瞬間に、パッと弧

立波形が出ます。その物理機構は、計算機実験をやりますとよくわかります。まず太陽風からのイオンがショックの前面ではね返されます。その結果、反対向きに走るイオンができます。反射イオンビームです。反射イオンがありますとビームインスタビリティが起こり、不安定になりプラズマ波を作るんです。こういうプラズマ波はイオンのビームモードと呼ばれます。従来はBENはイオン音波「的」波動とあいまいに呼ばれていましたが、実態はイオンビームモードと思われます。同じく反射イオンは遷移領域では電磁波に近い性格を持った遅波Xモードも作ります。それからホイッスラー波という磁場成分の強い電磁波も出ます。このホイッスラー波はプラズマ中ではもっともポピュラーな電磁波です。このシミュレーションに現れたように磁力線をよぎりながら斜めに伝播するホイッスラー波は電場成分を持っていますから、その平均電場成分で電子を加速します。電子加速はショックの遷移領域で生ずるイオンと電子の運動の差異で発生する静電的なポテンシャルによって起こると考えられてきましたが、私たちの計算機実験で明らかになったことは、それ以外にホイッスラー波の静電界成分の時間平均で残る直流電界でも加速されるということがわかりました。その結果、先ほど言いましたように電子は加速されます。一方のイオンは重いため加速をほとんど受けずに走れないので、電子とイオンの速度差ができます。電子とイオンが違った速さで運動すれば、結果として電流が流れます。すると、プラズマはBuneman不安定になり、非常に強いイオン音波が発生されるのです。イオン音波ができると、音波によって電子がユサユサ揺られますから、加熱されることになり熱い電子ができます。このようにシミュレーションを行ってみて初めて観測された事実が、絡み合った糸をほぐすように、次第にその実態が明らかにされてゆきました。バウショック付近の複雑なプラズマ力学が計算機シミュレーションのお陰でずいぶんわれわれの考えを助けてくれ、物理を理解できるようになりました。数十億円から100億円もかけて得られた貴重な、そして高価な科学衛星のデータを生かす上で計算機実験は、大変役立っていることがおわかりいただけたと思います。そう言いますと、コンピュータの中で宇宙空間が再現できるのなら、人工衛星など

は上げなくていいでしょうと考える人も現れます。それは違います。そうはいかないのです。スーパーコンピュータというのは速そうでも、まだまだ実際の観測に対応する大きな空間の中で起こっている複雑な現象をすべてシミュレーションで再現するにはあまりにも遅く、メモリーも小さいのです。メモリー制限とかスピード制限で、再現できるのはまだ宇宙のほんの一部なのです。それでも、20年前の時代に比べると驚くほどこの研究分野は進歩しました。

宇宙科学、宇宙プラズマ物理学以外にも計算機シミュレーションの役割は今後ますます大きくなると思います。たとえば宇宙機器は、これから宇宙にどんどん上がります。宇宙開発も日本は取り組んできましたし、今後はそのスケールもだんだん大がかりになってきます。そういうときにいきなり高い1000億円もするものをポコンと上げて、失敗したというわけにいきませんから、宇宙開発のほうにもスーパーコンピュータを用いたシミュレーションの技術を用いなくてはなりません。

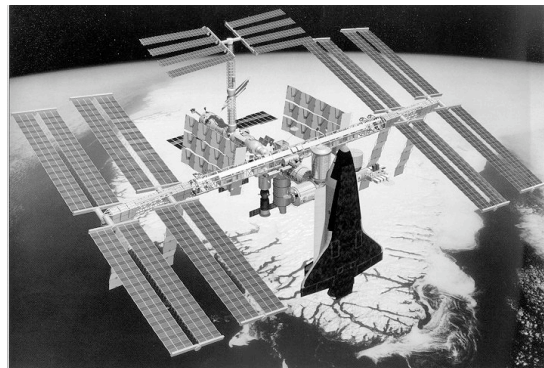


図7 国際宇宙ステーション。世界15カ国の協力の下、7兆円という巨費を投じ、2004年の完成を目指しています。

図7に示されている国際ステーションなどの研究には非常に大規模なシミュレーションをしないとはいけません。100台とか1000台のスーパーコンピュータをつないで宇宙シミュレータを作ったとしても、宇宙ステーションを建造するよりははるかに安いのです。そういうものを構築して、宇宙実験と地上のスーパーコンピュータの実験を組み合わせるのが重要だと、私は認識しています。

これまでは、宇宙観測とスーパーコンピュータで宇宙プラズマ物理学がどのように

進んできたかということの一端を紹介しました。宇宙科学の大きな原動力は「知りたい、わかりたい」という知的好奇心です。

私は理学研究者であると同時に電子工学者ですので、得られた学術的知識をなんとか実学の世界で使いたい、役立ちたいと考えます。宇宙空間を調べて、それがわかったというだけでは物足りない、感じるので。だから身近な宇宙、最初は地球周辺空間、ついで惑星間空間や月や小惑星資源の利用、そして現在科学的観測計画がNASAやESAや日本の宇宙科学研究所が観測を進めている太陽系惑星などを順次人類が利用できるようにする事が必要です。つまり「宇宙空間を「人類の生存圏のフロンティア」と考えるべきです。当面は地球の近傍空間の利用ですが、いずれは太陽系全部が生存圏フロンティアになると思います。

1000年間は宇宙科学は常に宇宙実利用の先端を走るでしょう。科学は先発隊でわれわれが使うところを調べていかないと、宇宙開発はドン・キホーテになってしまいます。そうならないように科学はいつも実用の前を走らねばなりません。しかし宇宙開拓は宇宙の科学的知的好奇心にとどまらずに、新しい宇宙文化とか宇宙文明を作るという意気込みでやりたいと思っています。賛成される方も反対される方もいるわけですが、太陽系空間の資源とか場所を利用して、生存圏フロンティアを拓ける事が、今後特に日本人にとってとくに重要だろうと思います。

いま宇宙船地球号という言葉をよく耳にしますね。人類は地球で大変危なっかしい綱渡りをした生き様をしているのですが、これは何も太陽が荒れて地球が危ないというだけではありません。地球の上で生きている生物全体が、自身の増殖で危なくなっているのです。人間もそうです。そういうことも考えないといけません。日本国は非常に豊かな生活をしていますが、よく考えてみると小さな島国で、食糧を買って、エネルギーを買って、物を買って人々の豊かな生活が成立しています。買えるからいいのです。買えなくなったらどうなりますか。札束でビンタを張っても、買えないという深刻な事態を私たちは考えないといけません。現在日本の食糧自給率は35%しかありません。エネルギーの自給率に至っては15%以下です。ほとんど全部外国に頼って

いるのです。うかうかすると日本は滅びるかもしれません。滅びないまでも非常に弱い国になるかもしれません。しかし、世界中が日本をあざけ笑っても、同じことはやがて世界中に起こります。世界全体が足りなくなったらどこに頼るのかと考えたら、やはり宇宙空間に生存圏のフロンティアを拓げざるを得ない。

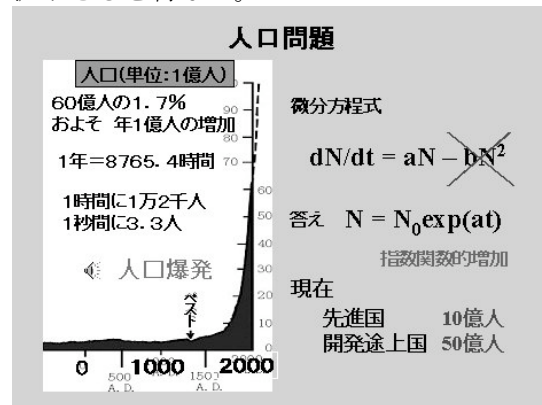


図8 世界の人口変化

たとえば人口ですが、皆さんがご存じのようにイエス・キリストが磔になった頃は、世界の人口は数億人しかいなかった。平安の都、京都に都があったころでも、やはり同じくらいの人口でしかなかった。世界全体で数億人です。ところが産業革命から急ピッチで人口は増加しています。このカーブを近似してみますとほとんど指数関数です。いまは人間がなかなか死にませんから、人口がNとして、増える率dN/dtはそのときの人口に比例するという単純な式になっています。そうすると答えは指数関数になります。まさに実際の世界の人口は指数関数で上がっている。この図では、現在先進国は10億人、途上国に50億人、合計60億人になっていますが、実は今年もう63億人です。指数関数というのはビューッとウナギ昇りに上がるのです。

しかし、人口はいずれ減るだろう、先進国の人口は減っているのではないかという話をよく耳にするでしょう。しかし、それは必ずしも真実ではありません。世界の総計で年間およそ1億人増加しています。1年間は時間に直しますと8765.4時間ですから1時間に換算しますと1万2000人が増えています。1秒間にすると、なんと3.3人も増えているんです。人口増というのはすさまじく、人口爆発というのはまさに適当な言葉です。もう少し大げさに言いますと、人間はゴキブリみたいに増殖していると言

っても言い過ぎではないと思います。

しかし人間は一人ひとり尊厳がありますから、食べる権利はあるでしょう。エネルギーも使うでしょう。衣服も着なくてははいけません。そしてそれぞれが豊かな生活をしたいと願いますよね。安定した生存を確保するには物の必要量は増加の一途を辿らないといけないのです。たとえば石油です。日本の文化もヨーロッパの文化もアメリカの文化も石油に大きく頼っています。地質学者の評価によりますと安い原油は165兆リットルぐらいしか残っていません。富士山を逆さまにして大きなバケツを作り、それで測ったら何杯ぐらい原油が残っているのでしょうか？ 富士山の体積はインターネットで調べると1060兆リットルと書いてあります。そうすると富士山のたったの6分の1しかない。原油はそれだけしか残っていないのです。

石油というのはものすごい勢いで使われています。日本人はバケツに1.5杯以上を毎日一人ひとりが掻き出しています。アメリカ人はたぶん3杯ぐらい掻き出している。そのぐらいの勢いで使っていますから、なくなるのは当たり前です。三、四十年で大変大きなパニックが来ると思います。エネルギーとか資源とか人口問題の本質は何かという事を、突き詰めて考えると原因は人間が増えているということです。図9を見てください。先進国に10億人、途上国にいま50億人います。先進国の生活水準は、途上国のおよそ10倍です。10倍豊かな生活を、われわれはしています。生活に必要な消費財、エネルギーとか食べ物、衣服、いろいろなものをひっくるめて「生活トン」という単位を使って表してみましよう。ここでは発展途上国の平均の生活水準に必要な「生活トン」を1生活トンとします。そうすると全世界で必要な物資、エネルギー、食糧などの総計は、

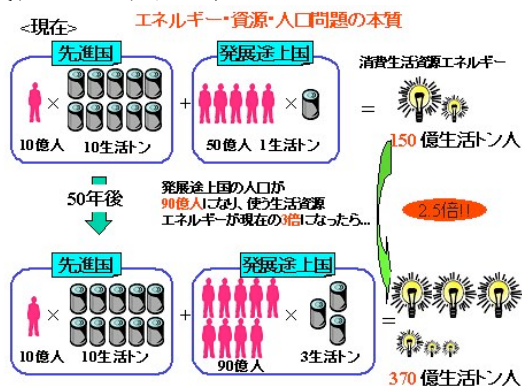


図9. 人類が抱える問題の本質

「10億人×10生活トン」プラス「50億人×1生活トン」で150億生活トン・人になりますね。全地球で、現在150億生活トン・人の物資、エネルギー、食糧が、何らかのかたちで回っていることになります。これでこの地球上の人類の生活が成り立っています。50年たったら、発展途上国の人々は90億人になります。先進国は人口も生活水準もそんなに増えませんが、途上国の生活水準もいまのままということはありませぬ。50年もたてば平均で発展途上国の人々の生活水準は低く見積もっても、3倍ぐらいに上がるだろうということは想像できます。そうしますと3倍の生活水準で90億人になったら、全世界で必要となる物資、エネルギー、食糧は370億生活トン人に達し、現在の2.5倍も必要になります。150%も50年間でわれわれは増やせられるでしょうか？

いまでも地球環境問題で「いかんいかん」ということはいっぱい言われていますが、もっとも深刻な問題、つまり絶対的な物、エネルギー、食糧の不足には全くと言っていいほど楽天的すぎます。では、どうするか。我々のようにいい生活をしているところは、いつまでもいい生活をする、途上国はできるだけ伸びないでおいでくれ。そういうことが言えますかという話です。南北問題というやつです。これは非常に難しいと、私は思います。日本人もいずれ決心しないとイケません。

日本は先ほど言ったように、いろいろなものを輸入に頼っています。たとえば石油も大量に輸入しています。この間のサウジアラビアでアラ石が長期契約を断られました。インドネシアからも石油を15%輸入していますが、15年前にスポット契約しかしませんと、日本は言われてしまいました。つまり札束でビンタ張っても売ってもらえない。そういうことが次々に起こると思います。そうすると日本は非常に苦しいのですが、いま言いましたように世界中がそうなりますから、結局今手に入れている場所以外のどこかに資源とかエネルギーを求めないといけないだろうと思います。

あるいは人間を増やさないようにしようという意見もあります。これは非常に難しい。途上国の人を人口を労働力や戦力としますから、しばらくはなかなか難しい。

アメリカだって人口は増えます。いま2億5000万人しかいませんが、100年後に3億5000万になるという推計もあります。ヨーロッパ諸国はいずれ減るでしょうと思っているかもしれませんが、人口が減るのは日本とドイツとイタリア、聞いたことのある国です。それからロシア圏です。これは経済戦争に負けましたよね。なんらかの形で戦争に敗れた国の人口は減るのでしょうか？ほかはみんな、先進国といえどもその人口は増えます。

ここで何とかしなくては、日本は人口は減るわ、労働力はなくなるわ、資源は入ってこないわ、などの長期的下落傾向で、私たちの子供、孫の未来は決して明るくはありません。そこで、先取りできる科学技術で孫子の時代を明るくしたいと思うわけです。せつかく宇宙科学が世界の先端を走っているわけですから、それを技術に生かそう。地球上の人類の生活は今工夫と決意をしなければ無茶苦茶になると私は思います。ちょうどその時期にロケットも進歩し、科学衛星の知識も得て、宇宙空間というものがわかってきたので、それを利用しようと思います。まずエネルギー問題は太陽発電所はかなり軽減されます。太陽は実質的には無限でしかも無料のエネルギー源です。しかもクリーンです。炭酸ガスも出しません。

宇宙太陽発システムのイメージ

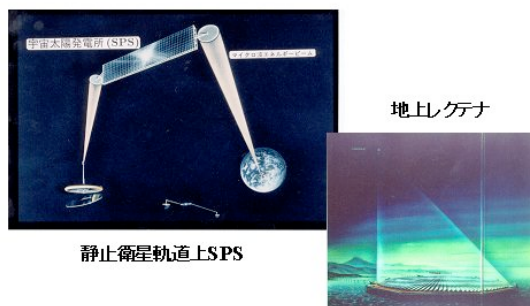


図10 宇宙太陽発電所のイメージ

太陽エネルギーを宇宙で電気エネルギーに変換し、マイクロ波を使って地上へ宇宙から持って帰ろうというわけです。太陽光はそのまま地上で使っていますけれども、太陽電池を地上に並べますと昼間しか使えません。日本の晴天率は30%ぐらいです。そのほか諸々の要因を考えますと、10倍ぐらい宇宙で太陽電池を使う方が有利です。宇

宙空間に太陽電池を広げたら、24時間、365日、現実には1年間に春分と秋分をはさんで一日に最大68分くらい真夜中に発電できない時期が40日くらいありますが、それ以外は四六時中発電してくれます。それを利用すれば領土も領海も小さい日本でも、技術だけで十分たくさんエネルギーを手取できるのです。

ところがマイクロ波ビームでエネルギーが宇宙から降りてきたら、ビームの中に入った鳥たちが焼き鳥になって落ちてきませんか、飛行機は落ちませんか、とか電子レンジのイメージで人々だって危ないんじゃないかという心配をなさるむきもおられます。そういうことは断じてありません。そんなに強い電波では送りません。マイクロ波に限りませんが、電波の安全基準は各国でちゃんと検討されています。日本の郵政省、いまは総務省ですが、1平方センチメートルあたり1ミリワット以下に下さい、と決めていますし、米国の標準機構ANSIは日本よりもちょっと強い1平方センチメートルあたり1.6ミリワット以下ならでよろしいと決めています。ヨーロッパでは日本とほぼ同じ、1ミリワット/平方センチメートルまでよろしいとしています。これはどういう基準で計算をしているかというと、人間は1人100ワットぐらいの発熱体です。その熱放出ができる以上にエネルギーが入ってくると、人間というのは体温を維持できなくなります。そういうことを考えて、さらに安全率を100倍ぐらい掛けて今述べた安全基準が決まっています。さらにマイクロ波は周波数が高いですから、表皮効果で体の奥には電磁界は入りません。ですから専門家の結論は、防護指針以下であればマイクロ波でエネルギーを送っても問題はまったくないということになっています。ですからイメージとしては太陽電池を大きく宇宙で広げ、それをマイクロ波に変換して、マイクロ波ビームで地上にエネルギーを降ろして、地上に広げたマイクロ波受電アンテナ基地で電気に戻すということを考えています。これが宇宙太陽発電所、SPSの基本概念です。地上の受電にはアンテナと整流素子を組み合わせたレクテナという整流アンテナを幅2~3キロメートル、奥行き3~4キロメートルぐらいの広い場所が必要です。その場所をいろいろ選定しないとはいけませんが、たとえば沿岸部の大陸棚、あるいは潰れたゴルフ場のよう

な遊休地を考えています。また、別の考え方として沖の鳥島のような日本最南端国土の無人島におろして、そこで電気を使って水を電気分解して水素をえて、エネルギー源にするということも検討しています。

S P S の特徴は、まず太陽エネルギーがただであることです。太陽エネルギーは無尽蔵です。太陽が死滅すれば、われわれも死ぬわけですが、それまでは大丈夫です。しかも、発電衛星で一挙にかなりの発電が可能ですので安定して大量のエネルギーが得られます。地上太陽電池発電は、家々の屋根などに設置して家庭用には使えますけれども、なかなか大規模な地上太陽発電はむつかしいのです。また、風力発電や地熱発電でも安定供給できて、しかも大量発電はできません。つまり基幹エネルギー源にならない。S P S ですと原子力発電とか火力発電と同等、もしくは同等以上の電力を安定供給することができます。さらに、大きな特徴としては、火力発電のように石油・石炭・天然ガスを必要がないので今、大問題になってきている地球温暖化ガスの炭酸ガスはまったく出しません。つまり、無公害なクリーンエネルギー源というのです。また、既存の技術の延長線上で建造が可能なのも特徴です。核融合発電の研究も頑張っておられますが、既存の技術でできるという断言はまだできません。是非成功してほしいとは思いますが、既存技術の延長線上というわけにはゆきません。

それから無線エネルギー伝送の技術は、すでに開発がずいぶん進んでいます。私もその一翼を担ってやってきました。今からもうかれこれ27年前になるでしょうか、私が米国のNASAエームズ研究所で、カニ星雲からのX線発生機構を研究したころに、アメリカがS P S の概念設計研究を進めていました。横目でこれはおもしろい、

マイクロ波エネルギー伝送の歴史(1)

1864	マクスウェルによる電磁波の存在の予言	■
1888	ヘルツによる電波の証明実験	■
1901	マルコーニによる無線通信の大西洋横断	■
1904	テスラによる無線電力伝送実験(150kHz, 1MW)	■
1940頃	日本軍によるマグネトロンの研究	■
1968	模型ヘリコプターへの送電実験(アメリカ) SPS概念の提唱(P.E. Glaser)	●
1975	30kW電力の地上2定点間無線電力伝送実験(アメリカ)	■
1978-80	SPSの詳細な調査研究と概念設計(NASA/DOE, アメリカ)	■
1983	電離層中でのマイクロ波送電ロケット実験MINIX(日本)	●
1987	マイクロ波給電(1kW)パラボラ飛行機実験SHARP(カナダ)	■
1992	マイクロ波給電 フェイズドレイ飛行機実験MILAX(日本)	●
1993	電離層中でのマイクロ波送電ロケット実験ISY-METS(日本)	●

図11 マイクロ波送電研究の歴史

さすがにアメリカのやることはでかいなと思って帰ってきたのです。それで日本の宇宙科学研究所にお世話になりましてマイクロ波送電と関連するプラズマ物理のロケット実験をやってみようと思って提案をさせてもらいました。2度失敗が続き、3年を無駄にしました。やっと3回目に成功しましたが、それでも世界で最初のマイクロ波送電の宇宙実験だったのです。1回目は私どものチョンボで失敗しました。2回目は宇宙研のほかの実験装置がしくじって、われわれは実験ができなかった。それで3回目にわれわれはロケットを全部もらって成功しました。世界で最初にわれわれがやったということが、今の若い人たちの頑張るバネになっています。

これがきっかけで、私はマイクロ波エネルギー送電の研究を始め、ジオテイル観測や宇宙プラズマの計算機シミュレーション研究と平行して、次々と新しい技術開発などを進めてきました。 京都大学だけでな

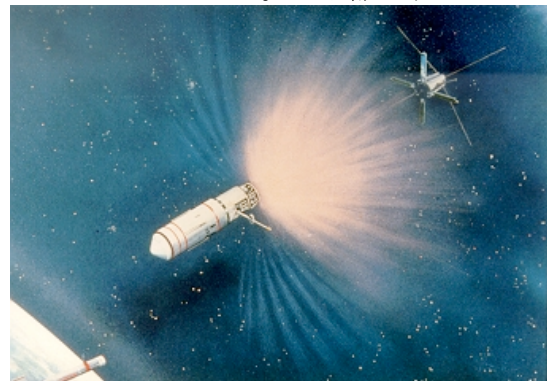


図12 世界初の宇宙空間中のマイクロ波エネルギー伝送実験(MINIX) 1983年

く、宇宙科学研究所の長友教授のグループや他大学の個々の研究者たちもS P S 関連の研究をすすめました。一方、アメリカはS P S のアイデアを出し、概念設計研究をただで、全然具体的実験や研究はやらなかったわけです。過去20年以上、アメリカという巨人が眠っている間に日本ばかりがいろいろマイクロ波送電の基礎実験を地道にやってきたんですね。最近のアメリカはそれを見ていて、やはり世界ナンバーワンでないといけないと思っている国ですし、科学技術も米国の政策としての位置付けがしっかりしていますから、1996年からS P S フレッシュルック研究というプ

プログラムを立てました。

基礎実験から再開するのにNASAが最初そろっと1億円の予算要求をしたら、上院議員が、なに？ほかの国に負けている？それはいけません。金をつけましょう、と要求額の3倍、3億円がついたのです。日本では1億円の予算要求をしたら、たぶん5000万円ぐらいしかつかないのとは大違いです。さらにこのグループはその次の年に5億円を要求した。そうしたら18億円ついたので。アメリカという国は、こういうことが起こるのですね。とにかく追い越されるのは気に入らない。私どもは必死で逃げているわけですが、日本というのはなかなか金をつかえない。京大でも今まで数億円くらいの金をもらいましたけれど、20年間努力してもそんなのはふっ飛んでしまう恐れがあります。

SPSを打ち上げるためのロケットのほ
うも、アメリカもいろいろ考えています。

アメリカは先ほど、X-33の予算を打ち切りました。これは第三世代のロケットということで打ち切ったのです。打ち切った理由は、第四世代のロケット開発をやらなければいけない。10分の1では駄目だ。100分の1にコストを抑えないと駄目だという強い考えがあって、10分の1のものは民間で競争してくれということですね。民間はずいぶん投資をしてきましたから、研究を続けると思います。100分の1ぐらいになったら、太陽発電衛星みたいな重たい、何万トンのものも非常に安く上がるようになります。それは何を意味するかというと、宇宙が一般の国民にも非常に近くなるということです。誰でも宇宙へ気軽に行けるようになることを意味します。

われわれは宇宙飛行士というと、特別の訓練をした特殊な人という目で見ます。しかし実際には去年、アメリカの大富豪がちょっと訓練して、何億円か払って宇宙へ行きましたよね。その前にもTBSの秋山豊寛さんがちょっとだけトレーニングを受けて宇宙へ行きました。だから腹さえくくれば、つまり、失敗の際には死んでもいいと思ったら、わりあい簡単に行けます。SPSの研究も同じことです。アメリカは電源やエネルギー源がいっぱいあり、石油の備蓄もきちっとしています。それでもSPSのような新しいエネルギー源の研究開発

をしようとしています。日本は電源のすごく乏しい国で、あらゆるエネルギーを外国に頼っています。つまり、エネルギーや食糧などの国民生活の安全保障に関して、首根っこを諸外国に抑えつけられている国です。だから日本こそが、SPSのような新しい研究開発を率先してやらないといけません、私は強く信じています。日本では、実際の実験などの研究開発ではありませんが、いろいろな役所や関連団体がSPSの調査研究活動を数多く行なってきました。現在は文部科学省傘下のNASDAが研究検討委員会を作って検討を進めています。私はその委員長を務めています。経済産業省もエネルギー業や宇宙産業に責任がありますから、やや遅れてUSEFという団体にSPS調査研究委員会を作って検討を進めています。そちらでも同じようなグループで検討を進めています。私はそちらにも参加しています。

マイクロ波エネルギー伝送の歴史(2)












1983	電離層中でのマイクロ波送電ロケット実験MINIX (世界初)	
1987	マイクロ波飛行機実験SHARP (1kW:パラボラアンテナ)	
1992	マイクロ波給電飛行機実験MILAX (アクティブフェイズドアレイ方式)	
1993	マイクロ波送電ロケット実験ISY-METS	
1994-95	5kW電力の地上・定点間無電線電力伝送実験	
1996	リトリアルクティブマイクロ波送電システムの開発	
1994	METLAB導入(京大)	
1995-97	SPSのフレッシュ・ルックスタディ(NASA、アメリカ)	
1998	文部科学省(NASDA) SSPS 検討委員会	
2000	経済産業省 SSPS 検討委員会	
2001-02	SPORTS(京大)、SPRITZ(京大-NASDA)実験装置完成	

図13. マイクロ波送電の歴史(2)

一方、大学では基礎研究として実験や開発を進めてきました。私ども京都大学が中心となって、宇宙科学研究所のロケットで世界初の宇宙空間でマイクロ波送電の実験を1983年に成功して以来、図12, 13の日の丸の旗に示しますように、マイクロ波エネルギー伝送の研究ではアメリカをリードしてきました。マイクロ波の送電技術を使いますと無燃料の飛行機を飛ばせることができるということをデモンストレーションするためにMILAXと呼ぶ実験とか、マイクロ波エネルギービームの制御技術などに関して基礎開発実験をやりました。(図14)



図14. MILAXマイクロ波飛行機実験

最近では、京都大学に世界でただ一つのマイクロ波エネルギー伝送実験設備であるMETLAB (Microwave Energy Transimission LABoratory) を1996年に導入しました。2000年にはSPS-LABを導入しています。



図15 京都大学マイクロ波送電実験設備

さらに、ここ2年間では太陽光で発電して、METLABの中でマイクロ波に変換し、アンテナから送電して、大型レクテナで受電し、直流電力に戻してキロワット級の電力を得るシステムを作っています。2.45GHzのマイクロ波を使う「SPRORTS 2.45」と5.8GHzの、マイクロ波を使う「SPORTS 5.8」というシステムです。SPORTS (スポーツ) というのは Solar POver Radio Transmission Systemの頭文字をとったものです。また、SPSの重要要素を市民にわかってもらえるデモ機としてNASDA



図16. SPRITZ実験装置

と協力してSPRITS (スプリッツ) というのを作りました。これはSPRITSの写真です。METLABの中に持ち込んで実験したのですが、一番上が擬似太陽光源です。SPRITZの上面に太陽電池が張っており、そのすぐ下に太陽電池の直流出力を5.8GHzのマイクロ波に変換する装置が入っています。さらに物装置の下面にアレイアンテナがあり、電波を下向きに打ちます。ここまでが宇宙に浮かぶSPSに相当し、床面のレクテナが地球上の受電所にあたります。宇宙太陽発電所と見

立てたSPSRITZからビームが降ります。このビームが自由自在に動き回ります。コンピュータで制御してマイクロ波ビームをどこへでも動かすことができます。ただし出力は5ワットです。これはどこへ持っていてもデモできないといけませんから、出力を絞っているわけです。

最近新聞でもご覧になった方は多いと思いますが、このSPRITSを公開したときに、朝日新聞や英文読売新聞などいろいろな新聞でとりあげられました。また、最近ではまた朝日新聞夕刊の科学欄で取り上げていましたが、いろいろな新聞で少しずつ世の中が宇宙太陽発電ということに対して関心を持ち始めたという気がしています。また2003年2月には90名を超える国会議員による「宇宙エネルギー推進議員連盟」もできました。20年かかりましたね。しかし、国としてやると決まったわけでもありません。関係者が少しずつ予算をお取りになって、われわれ大学人が長年やってきた基礎研究の成果を使っていたかと思っ

ています。将来の展望をお話しします。今世紀は将来への布石として、国民にとって必要な新産業創出という観点からSPSを基盤技術ととらえないといけないと思っています。宇宙は人類の生存領域、つまり生存圏として陸海空に続く第4の領域ですから、戦略的インフラと位置づけて、それをやらないといけない。純粋科学は非常に重要ですが、純粋科学だけでは駄目で、やはり得られた知識を生かして、新しいインフラや技術を開発するというのが、われわれ工学者の希望です。しかも国際競争力を持たないといけない。日本の宇宙科学は国際競争力がものすごくあります。一流の成果をわれわれは出していますが、それ以外に宇宙技術でもそういかないといけないと思っています。そうでないとすぐにアメリカが、人工衛星を上げるのだったらうちのを使ってください。いわゆるスーパー301を振りかざして、すでに商業化しているものは国が応援してはいけませんと迫ってきます。その結果通信衛星はいまほとんど全部アメリカの企業に取られています。だから非常にわれわれは腹立たしい。宇宙産業が育たない。いろいろな産業のバランスがあります。車が売れなくなったら困るとか、日本の国防力は弱いかからアメリカに守ってもらわなければならないとか、いっぱい弱みを持って

いますから、つい腰砕けになる。こんなことを言うと怒られるかもしれませんが、そんな印象を私は持っています。

ですから太陽系の中にエネルギー基地を作ることが、私の究極の目的でも何でもありません。ほんのワンステップでありまして、究極の目的は人類が争うことなく、生存圏のフロンティアである宇宙に展開して繁栄できるようにすることです。宇宙科学の研究をやっているのはそこを使いたいから、まずそこを理解したい。理解を十分した上で、そこを利用してゆくというシナリオです。宇宙開発に関しても、宇宙プラズマ科学者にとってもやるべき研究テーマはまだたくさんあります。SPSのような巨大な構造物を宇宙プラズマ中に上げたらいろいろなことが起こります。地球磁場をよぎることで、両端に高電圧が発生し放電しないようにプラズマ対策も必要です。大規模なオーロラ電流が流れたらどうなるか。静止軌道に上げたら、ときどき磁気嵐があり、磁気圏が荒れその影響を受けます。どうなりますか。大型の電気推進ロケットから排出される重イオンが磁気圏をどう変えますか？ こういった研究をSPS開発と一緒に進めていかないといけないと思っています。

予測では、地球周辺には100年間いろいろな人工建造物が上がるでしょう。通信衛星、気象衛星、放送衛星、資源探査衛星などがそうです。ところで資源探査衛星なんて、よその国の資源探査をするわけです。ここにあるよ、あそこにあるよというデータをみんなただで公開しています。それはお人好しいところですよ。公開するのだったら、見つかったら日本に採掘権なり購買の優先権を認めてちょうだいと言ってからデータを公開しないと、国民の税金で見つけておいて、どこの国でも勝手に使っているですよ、というのは愚の骨頂だとも思っています。戦略的に宇宙開発をとらえるべきです。それからデータリレー衛星、それから宇宙観光というのは50年もかからないうちに行われると思います。それから宇宙都市、宇宙工場というのは狙い目です。宇宙ステーションはもう間もなく上がります。それから太陽発電衛星はその次に来るべき必要な宇宙ミッションと考えます。まず地球周辺をそしてやがて太陽系をうまく使うわれないといけない。日本は領土が非常に狭いわけですから、資源も乏しいわけ

す。従って、宇宙に投資すべきではないでしょうか。しかし、今はお金持ち日本ですけど、それがなくならないうちにこれを実行しなければ手遅れになります。なぜなら、お金だってヘッジファンドなどがワートと値を吊り上げて、個々人がインターネットで株をどんどん買ったとします。彼らはボカンと株価を落とします。落としたときに「売り売り売り」とキーボードを必死になってたたいてももう遅い。みんなが売りにかかったら、インターネットはすぐパンクします。うまいこと日本人の金を取られます。貯蓄が1400兆円もあるというけれども、700兆円はすでに借金でペアですよ。残る 虎の子の700兆円を取られてしまうじゃないですか。だからやはり注意しないとイケない。

だから何で立国するか。どうやってわれわれは生きていくかということをや若い世代に伝えないとイケない。宇宙は科学も世界の先端ですし、電子技術もまだ世界の最先端にいます。ロケット技術はまだまだ世界最先端とはいきませんが、頑張っていますから、やはり太陽発電みたいに大きなものをちゃんと打ち上げるという目標を決めてやらないとイケないと私は思っています。

私たちが考えているロードマップでは100キロワットの宇宙太陽発電衛星は2010年までに打ち上げたいと計画しています。アメリカがやる前に日本がやりたいのです。これまでのあらゆる衛星はだいたい二番煎じか三番煎じです。安全運転、安全運転で日本は来ましたから、そのほうが失敗しませんし、いいのですが、諸外国は失敗を覚悟してやってきたわけです。エネルギーの分野は日本がいちばん弱いところですから、せめてエネルギーは自国で作るのだから、政府が金を出して開発すると言っても、アメリカはスーパー301を持ち込みませんよね。そういう分野で小さくてもいいから最初にやりたい。いちばん先に唾をつきたいというのが私の希望です。

アメリカは有人火星基地とか言っていますが、有人火星基地はずいぶん金がかかります。そんなことをやるぐらいだったら科学衛星をやったほうが良いという意見はもちろんあります。私はもちろん科学衛星とかエネルギー衛星に注ぎ込んだほうが、有人火星よりはいいと思っています。いまの段階では、火星だったら無人探査ができて

す。日本にとっては、有人宇宙開発を行うのだったら、月やSPSのほうがまだ実用的ですね。

2050年には宇宙の小さい町ができればいいな。私はそんなふうに希望しています。そうでなければ小惑星衝突や地球磁場反転など、地球は外的要因からも危ういですが、人間活動で中から崩壊する。そういうことは火を見るより明らかだと思います。それをくい止めるためにも太陽発電衛星ができるといいなと思います。

今言いましたような長期的展望以外に、なぜいま太陽発電衛星が必要かという、クリーンエネルギーです。地球温暖化対策で日本がいじめられました。100年間いじめられるでしょう。もうすでにいじめられています。京都議定書は、日本がずいぶん煮え湯を飲まされた。90年の排出量よりも6%減らすという約束に近いことをさせられました。アメリカはそのとき8%減らしますと言った。アメリカのほうが8%も減らして、えらいじゃないか。日本はたったの6%だと思うかもしれませんが、日本はそれまでにすでにずいぶん努力をやっていた。アメリカは日本ほど努力はやっていなかった。だからアメリカにとって8%は、実質的に日本の4%以下の値です。アメリカの外交使節団が京都議定書で、京都で記者会見をしてポロッと本音を言いましたけれど、今回の最大の成果は、日本に6%という数字を飲ませたことであると、新聞に出ました。

非常に腹立たしいと私は思いましたけれども、われわれは考えないとイケない。1つの温暖化ガス対策を達成しても次々今世紀中ずっと新しい要求が突きつけられます。一方、途上国に規制をかけない京都プロトコルは有効ではないとしてアメリカは脱落しようとしています。地球全体の問題ですから、それもわからないわけではありません。化石燃料はいずれなくなります。だから電気エネルギーを輸出して、途上国で電気のないところはずいぶんあります。そういうところにSPS電力などでちょっとでも応援すれば、日本の立場は強くなって、その代わり食糧を売ってねという話ができるでしょう。そういうふうに狙えるなと思います。

科学技術立国政策と言って、総合科学技術会議ではバイオ、ITや環境分野などの特定の分野には金を出しています。宇宙は

非常に重要だと私は思うのです。エネルギーとか食糧も重要だと思いますが、そういう分野には金は減らしましょう。ほかの新しい分野に回しましょうと言うのが平成17年度まで続きます。そんな愚かなことをしてはいけません。日本というのはエネルギーがあつてなんぼ、食糧があつてなんぼの国ですから、宇宙科学も宇宙技術もちゃんとやらないといけないと思います。それでこそ科学技術立国だと、私は思います。経済的にもずいぶんと日本の産業界は喜ぶ、活気づく。そうするとわれわれは元気が出て、将来が展望できるようになります。

それからいずれ最終的には太陽系文明を作るということを考えないといけない。100億人というのは、たぶん地球で許容できる限界ではないか。200億という人もいます。100億人というと、あと50年で達成しますから、50年というと、若い人はまだ生きています。ですから何とか考えなければいけないでしょう。

宇宙科学というのは宇宙開拓の先を走ります。これは非常に重要です。ですから宇宙開発の予算の15%ぐらいは科学に保証すべきだと、私は思っています。科学と技術の両方がちゃんと進み、日本国というものの先行きを考えて、科学技術がフルに使える宇宙空間の技術が発展してほしいと願っています。

生存圏フロンティアの宇宙プラズマ圏はプラズマの世界ですから、知識を出せるのは宇宙空間科学、つまり太陽系科学の研究者です。このような基礎科学は大変重要です。しかし基礎科学だけで止まってもいけない。いいバランスが必要なので、できれば宇宙予算全体の15%の基礎科学研究費を保証し、国民に、宇宙は何をやるのかという話を理解していただかないといけないと思います。以上のように今後は今回のテーマの宇宙空間圏のみならず生活圏、森林圏、大気圏などの生存圏の研究は学術上も実際上も大変重要な学問になります。