

## 太陽系文明の曙光と宇宙エネルギー利用

京都大学・副学長 松本 紘（前、生存圏研究所長）

皆さん、こんにちは。松本です。既に長らく講演を聞いていただいておりますが、あと1時間ぐらいご静聴をよろしく願いいたします。

私の演題は、「太陽系文明の曙光と宇宙エネルギー利用」です。宇宙のエネルギー利用という観点から宇宙発電所の話も少ししてみたいと思っています。

まず、今日いろんなジャンルのお話を大学からさせていただきましたが、今、世界はどう動いているかという観点が重要と思います。その観点は、次の4つに整理できると考えています。第一は「哲学」です。「哲学」は何をなすべきかを我々に語りかけます。それぞれ個人がみんな自分の哲学をお持ちで、何をなすべきかということをそれぞれ考えているわけです。

第二は「経済」ですが、これは、何が選択可能かということのを常に考えることです。第三は「政治」で、「政治」は何を意志をもって実行していくかを語り、決めてゆきます。世の中はこのように動いています。

それに対して、第四の「学術」の観点は、何が、なぜ起こっているかということのを皆さんに提示することです。つまり、選択肢の一つとして何ができるかということを示すということが学術の仕事だろうと思っております。

翻って前世紀の20世紀の科学はどうだったのでしょうか。18世紀、19世紀に比べますと爆発的に科学技術が進歩した世紀でした。先頭演者でありました九後先生のお話もございましたけれども、20世紀は物理学の世紀でした。その成果を受けて工業化が進み、非常に爆発的な科学技術が豊かな社会をもたらしました。その結果、人々のライフスタイルも変わりました。また、価値観の変化もありましたし、我々の使うエネルギーや物質の量も膨大に増えてまいりました。

それに従って病気もかなり克服され、病児、特に幼児の死亡率が大きく低下し、人口爆発が起こっています。同時に、その裏返しとして環境破壊、というネガティブな面も出てきております。つまり、人口増加は人類の繁栄という良い側面はもちろんありますが、環境破壊、不安定要因の増大の一因にもなっています。従って21世紀には私達はどうすればいいかという、大変大きな問題に私達は直面しているわけです。

後で述べますが、人口が増えると、いろんなものが必要となります。地球規模で考えますと、工業資源、エネルギー、食糧、水といったものが不足してきます。あるいは、周辺環境の破壊、地球温暖化が進むという問題もあります。また、狂牛病や新型の疫病という大変恐ろしい出来事も最近出てきております。また、生存のための地域紛争や国際紛争というものも多く起こっているということは、皆さんよくご存じのとおりです。

こういう問題はなぜ起こってきたかといいますと、地球という星に、人類が増殖して、文明・文化を発展させてきましたが、その生存基盤である地球の有限性が見えてきた事が本質的な原因です。今まで地球という星はキャパシティーに余裕があったのです。そのキャパシティーの限界が見えてきて、エネルギーや資源や食糧や水の問題というのが顕在化したわけです。

翻って、人間文明はどうやって発展したかということを考えてみましょう。その要因は5要

素に分けることができるかと思います。まず、「物」です。人間は物を手に入れ、生存のための物資を手に入れました。それは食糧、衣服、道具、工業資源などです。先ほど、チンパンジーが道具を手に入れるという話がございましたが、人類はこういったものを次々に手に入れてきたわけです。

それから、住居地、農地、工業用地等の「空間」を手に入れました。次は「人口」です。これはバカにならない要素ですが、人口も最初は少なかったのです。人間の数というのはどんどん増えてきて、そのプラス面を考えますと労働力や知力であるし、戦力ということにもなってきたわけです。

また、「エネルギー」を手に入れ、それをコントロールできるようになったということも大変大きな進歩要因です。太陽エネルギーというのは、最初に人類が利用したエネルギーでした。次いで火を手に入れました。最近では電気エネルギーを手に入れ、さらには原子力を手に入れました。入手エネルギーを次第に拡大してきたというのが人類文明の大きな要素であります。

しかしこれのいずれも、使えば使うほど減っていくという宿命にあります。人間の要求はどんどん膨らみますが、これを支える物資・エネルギーなどは有限です。時間スケールはそれぞれ違いますが、有限には違いありません。

それ以外に人間の特徴としては、「知識・技術・知恵」というものを蓄えることができるという、5番目の重要な要素を持ってきました。これは減らないという特徴があり、上記の四つは増大に上限があるものとは異なります。

まず人口について振り返ってみたいと思います。基本的には人口というのは病気などの減少因子がなくなりますと、簡単な微分方程式に従います。その答えは指数関数になり、ウナギ登りに人口は増えます。人々は現在、先進国に約10億人、途上国に54億人ほど人々が住んでいます。

注意すべき事は、現在でも65億人の1.7%の人口が毎年増えています。これは1年間で1億人の人間が増えることを意味しており、バカにならない大きな数字であります。1年は8765.4時間ですから1時間に直しますと1万2000人、1秒間に3.3人のペースで増えています。これはまさにびっくりするぐらいのスピードで、ゴキブリとあまり変わらない位にうじゃうじゃ、うじゃうじゃと人間がこの地球上で増えていると思ってもらっていいわけです。

こうして2050年には世界人口は90億人から100億人に増えると予想されています。一方、日本では少子高齢化の影響で、現在、人口のピークを越え、次第に人口は減少し、今世紀末には50%から70%も減ってしまいます。

この人口減少は日本だけではありません。今後、人口減少する国は日本とドイツとイタリア、それからロシアです。何となく戦いに破れた国々の人口が減っていくという感じがしますね。

次に物資のほうを見てみましょう。人間はただ生存するだけでなく、生活水準の向上をめざします。しかもその総人口もどんどん増えています。したがって時間とともに人間に必要な物資の需要は上がっていきます。一方、地球という星が、我々に供給してくれる量は、伸びはしますが、その伸び率は小さく、需給の逆転は必ず起こります。これがローマクラブが1970年代に既に警告したことであります。その逆転がいつ起こるかということを実際に考えないといけません。

例えば、食糧について、日本の場合にその自給率は、昭和35年には80%あったのが、現在は30%台に落ち込んでおります。世界中の食糧生産量の見込みをもって、一体何人ぐらい養える

かということを推計しているワールドウォッチ研究所のデータがあります。アメリカ人並に食べますと、世界全体で28億人しか養えない。現在は64億人いますから食料は全然足りませんよね。しかも毎年1億人増えているわけです。現在のインド人並みに食べますと100億人ぐらいは養えます。日本人の食べる量はその中間にあるわけで、日本人並みの生活を世界中に広げるとは食料の観点からも不可能です。こういうふうには食糧についても決して安全ではありません。

もっと重要なことは、食糧も大変、水も大変ですが、意外と見逃されているのが主要な資源とか鉱物資源の残余年数がないということです。金、銀、銅、石油、鉛、亜鉛、天然ガス、ウラン、モリブデン、タングステンといったものは、残余年数が100年もありません。(図1)つまり、これらは1世紀のうちになくなってしまいます。最近、新聞紙上、鉄とかステンレスがよく盗まれるという話がありますけれども、供給する量と需要がバランスを欠きますと、ああいふ窃盗事件にまで及びます。世界中で足りなくなったらどうなるのでしょうか。大変な問題であります。代替物質を考えていく必要もあるし、また再利用を真剣に考えないといけないという事態になっていることを我々は認識すべきであります。

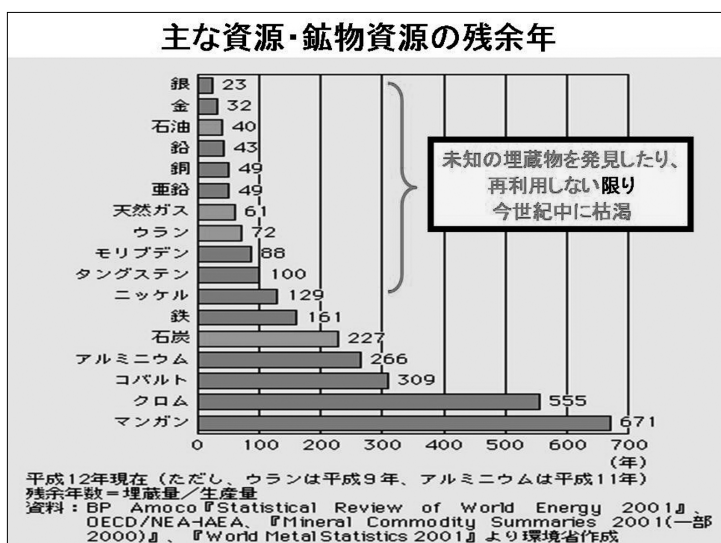


図1

これと関連して、予想されている事態は、2020年以降に工業生産が減少するというところで、そのシミュレーションも行われています。この予測の理由は、再生できない資源の獲得が次第に難しくなるということと、エネルギー資源の需要も年々上がってくるからです。後ほど示しますが需要は急速に増えるため、供給が追いつかなくなり経済破綻、各産業の低迷ということにつながります。そうなりますと、今度は逆に資源の再利用方法や代替物資の研究開発も、新たな資源獲得もできなくな

るといふ悪循環に入るわけです。飢餓、病気などの要因を含めて急激な文明破壊ということに至るかもしれません。こういう心配を真剣にする時点に差しかかっているのではないのでしょうか。

それでは、非再生資源をもっと発見する努力をすればいいんじゃないか、その結果もっと見つかったら大丈夫という議論もあります。しかし、これらの不足する資源が先ほどの推計値より2倍存在したとしても、危機は20年延びるだけです。つまり、我々が生きているうちに大変な問題になるわけですね。最悪の場合には2020年ぐらいに、この需給カーブのクロスポイントが来るんじゃないかと心配しています。これは最悪の場合ですが、供給不足が明らかになるのは2200年とか2100年という遠い将来の事では決してありません。今世紀中にこういうことが必ず起こります。

次にエネルギーの事情を見てみましょう。2050年、今世紀の半ばを考えてみましょう。人口はおよそ93億人と推計します。そうすると、一人一人のエネルギー消費量の平均値が現在のままだとしても、総エネルギー需要は現在の1.5倍必要になります。93億人の世界の民の生活水準

が日本人並みに上がったとすると、4倍必要となります。さらに、アメリカ人並みというか先進国並みだとすると5.3倍要ります。その需要に応えられる供給はおよそ不可能であります。

一方、お隣の国の中国では、1983年ごろには、自転車で道路がいっぱいでしたが、現在、大都市では立派な車社会になっています。それに伴って急激にエネルギーの消費が伸びています。

先ほど、ウランの残存期間が72年と言いましたが、ウランは再利用してプルトニウムにしますと約100倍に延ばすことはできます。しかし、安価な石油につきましては、あと40年しか供給できません。昔から40年と言われているから、また眉つば話で狼少年だという話をされる方もいますが、そうではありません。地球科学者の原油の残りの推計が出されています。安い原油は幾ら残っているかという推計では、世界中で165兆リットルと言われています。兆リットルと言われても誰もぴんときませんね。一升瓶位の2リットルという量なら直感でわかりますが、1兆リットルというのはもう想像を絶する数字で、なかなかイメージがわかりません。

それで、この165兆リットルを何かでっかい器ではかって直感できるようにしてみましょう。富士山を逆さまに向けて大きな器にして計ってみたらどうなるでしょうか。一体原油は何杯分残っていると思いますか。実は、富士山の容積というのは1060兆リットルなのです。原油は165兆リットルしか残存しないので、残存石油は富士山1杯分どころか、底の方に少ししか無いということです。つまり世界中の原油の残りを富士山というでかいバケツではかりますと、たった6分の1弱しかないということです。石油はいろんな化学・医薬品に使えますから、地球温暖化にも悪い影響を与える燃焼は、できるだけ早期にやめるべきではないかと思えます。

次に空間、つまり環境ですが、環境や地球温暖化問題は、昨今いろんなところで議論されていますからあまり語る必要は無いかもしれません。石油、石炭を燃やしてきたツケが今回ってきて、気象学者の予想だと、21世紀末には気温が1.5度から6度上がると言われています。6度も上がったら大変です。大阪の最高気温が夏39度。6度上がりますと45度、風呂より暑い。ちょっとドアをあけて「ふろへ行ってくるわ」と、“だじゃれ”なんか言えない状態になります。これはもう大変で、温暖化はストップしないといけないというところに来ております。

また、砂漠化も急速に進んでいます。先ほどチンパンジーの住んでいるアフリカの話がございましたが、これはそのアフリカのサバンナの写真です。松沢先生が行かれるような領域でございしますが、これが40年たったらどうなったか。実はこんなふう完全に砂漠になってしまっています。たった40年です。40年というと、今から40年前は自分がどうだったかということ振り返っていただくとわかると思えます、たった40年でこういうことが進行しているのです。

要するに、地球という星のキャパシティーがなくなって、その星にそれにうじゃうじゃ、うじゃうじゃ人間が増えて、非常にぜいたくな生活をして好き放題やってきました。これ自体はある意味ではいい面もありますが、自分たちで自分たちの首を絞めているという事実があるのです。それを科学技術でどう乗り越えるかということが一番重要なのです。一個一個の問題をつぶしていっただけでは、この深刻な問題の解決はできません。したがって、かなり広い視野を持ちながら、全方位から問題を解決しないとイケないのです。

まずこの問題の本質を振り返ってみましょう。現在人間は先進国に10億人、途上国には今現在54億人生活しています。生活に必要な消費財の一人当たりの使用量は、先進国では途上国の10倍です。つまり、10倍豊かな生活をしています。食糧、水、エネルギー、全部そうです。世界全体では150億生活トン・人という量を現在使っています。それが50年経ちますと、人口は90億人に増え、生活水準の向上で途上国の人たちが3倍ぐらい消費量を増やすと考え、先進国

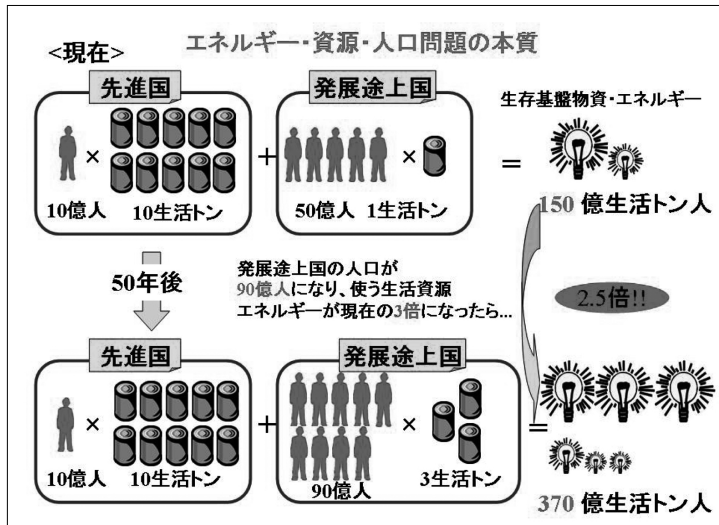


図2

の個々人の消費量がそのままとしても、世界全体で必要な量は370億生活トン・人、つまり2.5倍も必要になります。(図2) 2.5倍の量を、エネルギーも食糧も水も、すべて増やさないとバランスシートが合わない。これは明らかに無理でマクロにバランスが成り立たないという事態に来ているということを我々は認識すべきであります。これが問題の本質です。

これを人類史的課題と称して、日本学術会議では行き詰まり問題とい

うふうに定義しています。つまり21世紀初頭の人類的課題は、根本的に地球の物質的有限性をどう打破してゆくのかということで、あらゆる学問、あらゆる技術、あらゆる知恵を集約して、この問題に取り組みなくてはならないということに来ているといいます。

この行き詰まり問題は、従来の20世紀型の学問あるいは社会の努力だけでは解決できないと思われます。つまり、個別研究だけではうまくいかなくて、多様な人材や、多様な枠組みの中で革新的、学際的な新しい学問分野の開拓が必要です。

言い換えますと、20世紀の科学は「繁栄するための科学」でした。18世紀、19世紀の苦しい時代の生活から繁栄を目指して科学技術が使われてきました。大変いいことです。しかしながら、20世紀末には行き詰まってしまいました。そうしますと、21世紀は行き詰まりで人類文明が衰退しないように、それを持続的に緩やかに豊かな社会を築いていくという、「持続のための科学」が必要であるということになります。京都大学でも、生存基盤を考えるような総合的な、いろんな学際的な学問領域をつくる必要があると考えるようになっていきます。それが、「生存圏研究所」という形で、尾池総長着任後の第1号の新研究所として国立大学法人化した時点でつくり上げております。また、生存基盤の科学といいますのは生存圏という領域の問題だけではなくて、あらゆる学問が必要で、力を合わせてそういう研究をやろうということで、「生存基盤科学研究ユニット」を創設しました。この問題に早急に取り組み、問題解決の端緒としたいと考えているからです。

根本的には行き詰まり問題はこういった色々な資源、エネルギー、人口問題、環境問題が、地球という限られた世界が原因で生起している問題です。したがって宇宙空間に目を向ければ、展望が開けるのではないかと私は思います。今日の話はその話を主体にしたいと思ってやってきました。「地球だけに執着しない」という視点を持って、1000年ぐらいのスケールで考えてはどうかということです。

そのためには、ターゲットとしては宇宙空間を利用するということを最初に考えます。宇宙開拓と太陽系文明ということ視野に入れて、決して地球上で人間同士が争ってバカなことにならないように考えていくことが必要です。そのためには科学技術が力を発揮する役割というものがあると考えます。

つまり、地球上の資源の循環や再利用だけでは人類生活を維持できないという時代になるお

それが非常に高い。そうしますと、地球外の資源を利用するということが当然考える必要があって、人間の生存圏は宇宙圏を視野に入れて研究開発をしていくべきではないかということになります。

当面の1000年間を考えます。「何、1000年も先、バカなこと言うな」と思われる方は多いかもしれませんが、1000年前を考えてみたらあつという間の出来事という事が実感できるでしょう。1000年前には京都に平安の都があったわけです。その時代のことを我々はよく知っております。1000年というのは、東の間です。そんなに先のことではありません。

1000年ぐらいの期間だと、やはり太陽系文明というものを視野に入れる必要があります。太陽系には、水金地火木土天海冥という惑星群があることは知っています（冥は惑星ではなくなりました）が、そこがどんな世界なのかということをもっと知る必要があります。そのための科学が宇宙空間科学で、現在はその宇宙空間（スペース）で技術を開発するための先発隊として役立つ意味もあって、太陽地球系の科学に私を含む研究者が取り組んでおります。

太陽系の中心はもちろん太陽ですが、太陽というのは1000年ぐらいではへこたれません。十分に使えます。しかし、太陽物理を研究するだけでも大変難しい問題がありますが、太陽が地球を含む全太陽系の命の源であることには違いありません。太陽からは光、特に可視光が強く放射されています。その可視光に合うように我々の目は進化したと言えます。可視光に一番感度の高い目を多くの生物は持っているわけであります。

それ以外に、いろんな電磁波やプラズマが太陽から流れ出ています。プラズマは物質の第四状態です。物質の4状態は以下の通りです。例えば、水の第一状態は氷という固体です。それを温めますと水という第二状態の液体になります。もっと温めますと水蒸気という第三状態の気体になります。固体、液体、気体と変化しますが、更にエネルギーをつぎ込みますとプラズマという状態になります。本日の冒頭、九後先生からお話がありました原子核と電子という構成がさらにバラバラになって、プラズマという電気を帯びた物質に変わります。宇宙空間全体の99・999%はプラズマという状態にあります。つまり物質の第四状態にあるわけです。

この地球上のように、物質が固体や液体や気体状態にあるというのは宇宙全体では例外的です。これが湯川先生が最初にプラズマを研究なさった一つの理由ではないかと思えます。太陽はプラズマの塊りですが、太陽というのは、おとなしい星かというのと、決してそうではありません。太陽からはプラズマという大きな高温のガスが四方八方に飛び出しております。これを「ステレオ」という科学衛星で観測した実際のムービーをここに示します。

この真ん中の太陽は黒い丸で隠してあります。太陽の周辺を回っているのは惑星ですね。時々バーン、バーンとプラズマの塊が吹き出していますね。こういうふうには大きなコロナのマスが、地球への方向も含めて宇宙空間へボンボン噴き出しているというのが太陽波動の実態です。こういう事実を十分知った上で太陽系の利用ということを考えないといけません。つまり、風車という実態を知らずに怪物と思って猛進してしまうドン・キホーテになってはだめで、太陽系という実態をよく知った上で、そこを利用するということが必要です。

つまり、太陽からは光以外にプラズマというものが我々の地球という星にも到達しているわけです。幸い地球には磁場があり、その侵入を防いでくれているという状況下にあります。太陽のフレアという言葉が聞かれた方が多いと思えますけれども、フレアとか、コロナのマス放出というものが出現しますと、大体3日から5日間で地球にやってきます。地球の周辺には、スペースシャトルとか人工衛星が飛んでいます、これらが影響を受けます。地表面は幸いな

ことに磁場や大気で保護されているので直接影響を受けることはありません。しかし、南極、北極はプラズマが粒子が浸入し、オーロラなどのいろんな現象を引き起こします。また、このような状況下では、実際には衛星が故障したり、いろんなことが起こります。そういった問題に対処すべく、科学的な知識を集積するというものが太陽地球系科学の役割であります。

これは「ジオテイル」という人工衛星です。今でいう宇宙航空研究開発機構（JAXA）、当時の宇宙科学研究所（ISAS）、で打ち上げた衛星で、私もこのプログラムにプラズマ波動観測チームの主任研究者として参加いたしました。小さな衛星で、その大きさは両手を広げたぐらいです。アンテナだけが長くて、この演台からホールの壁までの距離以上に長いアンテナを4本伸ばしています。長い長いアンテナが3秒間に1回もビューン、ビューン回って宇宙空間を観測します。お月さまの軌道より遠くへこの人工衛星を飛ばして、この周辺の状況の情報を収集するというをやってまいりました。

私は科学研究者ですので電波観測をしてきました。GEOTAILも非常に奇妙な電波を見つけました。その波形はここに出ている図3の右下に示すようなものです。これをぱっと見せたら心電図じゃないかと思えますよね。初めは、こんなものが見つかったときは、自分達の装置が故障したかと思いました。實際上、学会でこのようなものが発見できたと発表したら、それは君たちの装置がおかしいんじゃないかということをする研究者もいました。「とんでもありません、自然現象です。」

と言っている議論をしたんですけども、これが実は新しい発見になりました。

理論の先生が今朝話されたのでちょっと言いにくいんですが、理論屋というのは、いろんなことをおっしゃいますが、大抵20年ぐらいすると、みんな間違いだったということがよくあります。みんなと言ったら怒られますね。大部分が間違っておったということが多くありますが、実はこのBENにつきましても、世界中で20個ぐらい理論が出ました。私も恥ずかしながら自説を出しましたが、間違っておりました。実はBEN（広帯域静電ノイズ）と知られていた波動の波形を詳しく調べてみたら、先ほど言いました心電図みたいなパルスが見つかったのです。このBENの正体のかなりの部分が、こういうパルスで占められているということがわかったんです。

宇宙人の心電図と違いますかと冗談も出ましたが、実はこれは物理的に意味のあることがあることが後ほどの研究でわかりました。また孤立パルスが繋がったようなものも受信されたり、もっと連続した波形も見つかりました。

これは一体何だろうということで、電子という古典的な素粒子の力学を調べてみました。大変数学的にはややこしく、手計算ではできませんが、最近ではスーパーコンピュータという便利なものがあります。私どもの頭で追求できないものをコンピュータに解かせるのです。ス

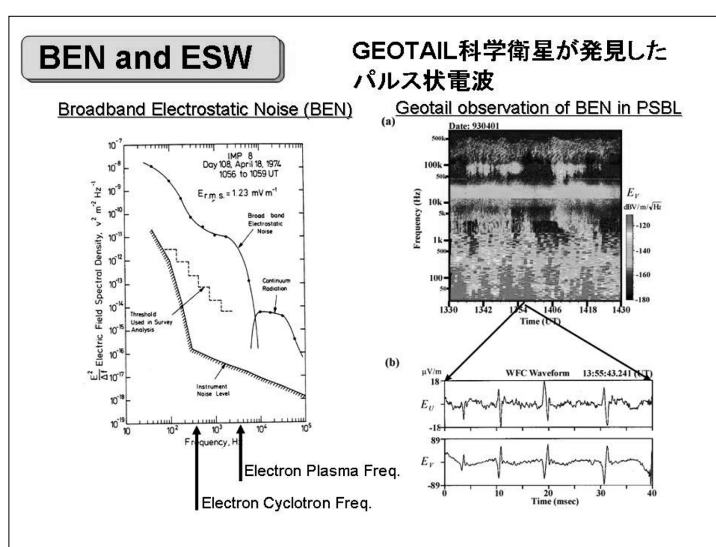


図3



スーパーコンピューターは10億連立方程式でも平気で解いてくれます。10億連立方程式を解くことで電子の非線形挙動をシミュレーションしますと、実に見事に観測結果と同じものが再現できました。図4の下半分はコンピューターが再現したもので、上半分はシミュレーションの結果再現された波形で、両者は酷似していますね。

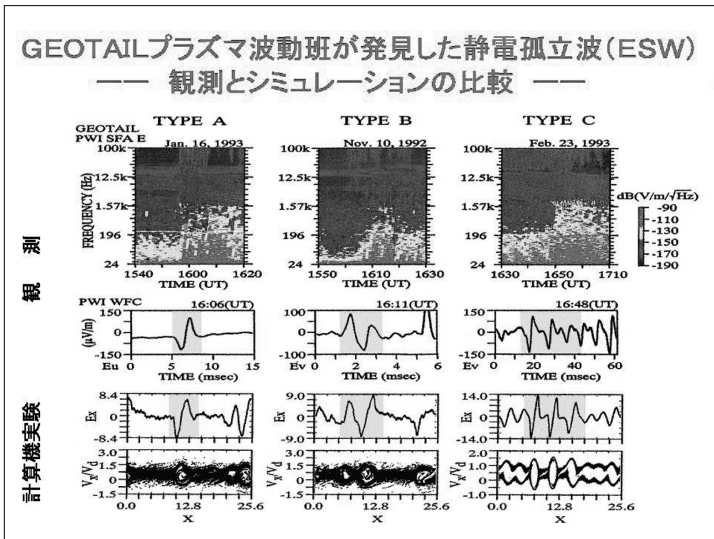


図 4

コンピューターは賢くて計算途中のデータを全部メモってくれてますから、ゆっくり後で考えながら、どういうことが起こっているかということを探求できます。その結果わかったことは、電子の泡みたいなものが宇宙空間を飛び交っているということでした。

スーパーコンピューターのシミュレーションのアニメーションを見ていただきます。この図では電子は既に非線形プロセスで塊りになっています。この図の縦軸は速度、横軸は場所です。電子は固まってバンチン

グしています。時間の経過に伴って、その塊同士がぶつかって1個になります。まさに弱肉強食の世界です。大きい電子の塊が小さい塊を飲み込みます。電子の世界でもこのような弱肉強食の現象があるんですね。経済界と同じです。今、飲み込みました。(ビデオ)でかいやつが小さいやつをどんどん飲み込んでいって大きくなってきます。實際上、人工衛星で測ったこの電子の泡の大きさというのは、数百メートルから数キロメートルに及びます。そういうものができますと、観測されたパルスが発生するということが理論的にもわかりました。これは一例ですが、こういった物理現象の研究も必要です。つまり、宇宙へ出ていって、それを利用しようというときには、太陽現象に起因するいろんな現象、その素過程を研究するということが大変重要だと考えています。

話はかわって、エネルギー事情について述べたいと思います。世界のエネルギー消費は1990年、およそ15年前ですが、12・2テラワットでした。2025年には、20テラワットから25テラワット必要だと言われています。最大の需要の伸びは、当然、皆さんご想像のとおり、発展途上国で起こっています。そのため、隣の中国なんかはすごい勢いで石油を輸入しています。

石油、石炭を燃やしますと、炭酸ガスが出て地球温暖化につながります。これは阻止しないといけないということは既に認識されるようになりましたが、エネルギー最大消費国でありますアメリカが、まだ京都議定書にサインしていません。一番まじめで優等生なのは日本人であります。日本人の優等生の努力を世界中に広げてもらうということは大変重要ではないかと思っております。

エネルギー需要に応えるためにエネルギー生産が必要ですが、石油、石炭を燃やすという方法ですと、炭酸ガスが出ます。炭酸ガスが出ると地球温暖化で自分の首を絞めるということを考えますと、炭酸ガスを出さない大型で安定的なエネルギー源を別途考える必要があります。

原子力発電はその一つかもしれませんが、昨今、新聞に出るような事故や安全に対する不安



## 宇宙太陽発電所 SPS

クリーン・大規模・無尽蔵なエネルギー源



図5

もあります。そこで、ベストミックスのエネルギー源を目指すこととなりますが、宇宙から安定的な太陽エネルギーをとるというシステムもその一つの有力源として真剣に考え、その研究を続けてまいりました。

これはそれを実現するための概念図です。(図5) クリーンでかつ大規模で、無尽蔵なエネルギーを、燃料代不要で入手できます。ただし、宇宙空間に大きい人工衛星を打ち上げる必要があります。

1キロワットアワーの電力を発生させると、火力発電では846グラムの炭酸ガスが出ます。この部屋の電灯は明るいので、キロワット以上ありますね。1キロワットの電灯を1時間つけておきますと、炭酸ガスはおよそ1キログラム出てしまっているのです。それに対して原子力発電とか宇宙太陽発電でエネルギーをまかしますと、それぞれ22グラムと11グラムしか炭酸ガスが出ないのです。大変クリーンなエネルギー源になります。地球温暖化は炭酸ガスが地球をすっぽり包んでしまうということに主因があるわけですから、それを避ける意味で炭酸ガスを出さないクリーンなエネルギーに切り換えていく必要があります。

太陽発電でも、地上で屋根の上に太陽電池を張って発電すればよくて、何もわざわざ宇宙まで上げなくていいじゃないかという質問をよく受けます。残念ながら地上の太陽発電では、曇りの日もありますし、夜は発電できませんし、効率を上げることはできません。一方、宇宙に太陽発電機能を持ち上げますと24時間常時クリーンなエネルギーが得られます。

問題は、電気をどうやって地球に持って帰るかということですが、これは簡単です。電波、(あるいはレーザー) で持って帰るということを考えています。

SPS (宇宙太陽発電所) のターゲットは、1キロワットアワー当たり8円ぐらいで発電することです。原子力発電の発電コストは6円ぐらいです。

したがって、クリーンなベストミックスエネルギー源の重要要素として宇宙太陽発電所というのは、少なくとも21世紀初頭には、かなり大きな部分を占めていないといけません。SPSは今世紀の後半に真剣に開発が行われるプロジェクトであろうということは電力関係者も言っています。私どもはその研究をずっと続けてまいりました。

いろんな形態の宇宙太陽発電所を検討してまいりましたが、この図6は大型ミラーを使って太陽からの光を常時この太陽電池の表面に当て発電して、それを電波に変換して地球に送り返す回転ミラー型の太陽電池のモデルです。

この回転ミラー型のSPSはどのように動作するかというと、こうです。SPSを静止軌道に打ち上げると地上からは静止しているように見えますが、SPSは地球の回りを一日一回周回します。この方式では太陽がどの位置にあっても、このミラーシステムを使っていつも太陽電池の上に光を集めることができます。それで24時間発電でき、それを電波に変えて地上に送れるのです。

宇宙太陽発電所というのは、そういった意味でクリーンエネルギーで大変優秀です。しかし、

## 回転鏡システムSPS JAXAモデル

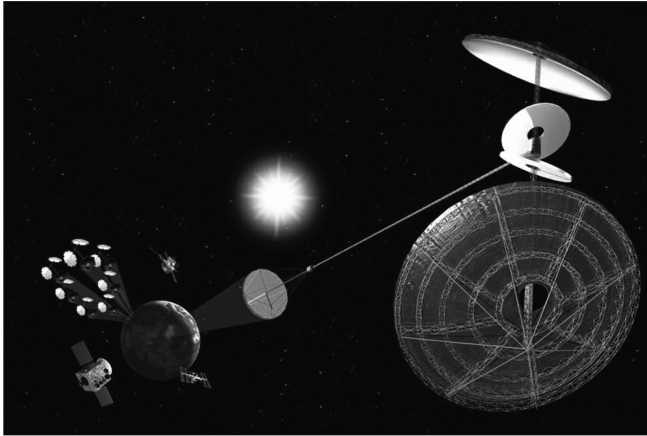


図6

日本の研究開発体制にも村意識というものがあまして、既得権はなかなか離さないという風習があります。役所なんかでも縄張り争いというのが厳とあり、なかなか大型の新しいプロジェクトは進みません。自由民主党には宇宙エネルギー利用推進議員連盟（92名）ができておりますが、すぐに動かないプロジェクトに対してはあまり迫力はまだありません。一方、宇宙開発委員会では長期計画として宇宙エネルギー利用システムに関する研究推進を唱えて

いますが、その中でも、宇宙太陽発電所の必要性を説いております。

また、閣議決定で、エネルギー基本計画というのを2003年に策定していますが、その中でも宇宙太陽光発電は長期的視野に立って取り組むことが必要な研究開発課題と位置づけています。しかしながら、実際問題はなかなか新しい研究というのは、いろいろな事情で、進んでいません。

しかし、一方では逼迫したエネルギー需要が発生し、かつ地球温暖化は緊急にストップしなければなりません。これを考えると、SPSはやはり国民の声を大きくして早急を実現すべきではないかと思っています。研究者としては、それが選択ができる、何ができるか、どこまでできるかということを示すべく、日々研究開発に取り組んでいるところであります。

なぜ急いでやる必要があるのか、よその国がやってからやればいいのか、という声もあります。これは日本人が過去に得意にしていたやり方ですね。アメリカあるいはヨーロッパでできた技術をそのまま導入して、それを効率化してやればよくて、経済的にはそのほうがずっといいよという話だったんです。しかし、最近では日本ただ乗り論というのがあって、世界の最先端まで到達した日本人は自分たちの手で世界初の事業をやるということが必要です。

特に、エネルギー問題では大変重要で、先行優位の法則を十分考慮する必要があります。デファクトスタンダードという概念があり、あるシステムが出来上がりますと、国際的に協定ができます。そのときに、自国の技術でもって世界のスタンダードとすると経済的にはるかに優位になるのです。

つまり、エネルギーというのは自国の安全保障にとって最も重要な項目の一つではありますが、我が国ではその意識は著しく低いのです。アメリカなどが関係している戦争の大部分はエネルギーと関係して起こっています。エネルギー安全保障として、SPSにも我が国も真剣に取り組んでおかないと、他国に先行されると「あなた方、後発国はだめよ」という核兵器などと同じ状況になりかねません。核兵器を持っている国は持っているよと、持たない国は持ちやしませんよ、ということが国際法上まかり通っています。SPSのような新しい技術については先に日本ができることで押さえておく必要があるというのが私どもの主張であります。電力を外国に頼ることになりますと、全く国の安全保障というのはあやふやになります。ですから、自分たちの手で電力は確保しないといけないと思っております。

さて自己宣伝めいてきますが、京都大学におきまして、こういう関係の研究をどのように進めてきたかということについてお話しいたします。すでに1970年代の終わりごろから、こういう問題に私個人は関心を持ちまして、宇宙でのエネルギー無線送電に関し、世界で最初の宇宙でのロケット実験を行いました。そのロケット実験はきちんと成功し、科学的データは得られました。しかし宇宙で発電してマイクロ波でエネルギーを地上へ送ってくることについては、そんなことできるのかと、人々は疑問を持ちます、そこで目に見えるもので実証する目的で、モデル飛行機をマイクロ波エネルギーだけで飛行させる実験（MILAX）を実施しました。1992年のことです。地上からエネルギーをマイクロ波で送り、電池も何もない飛行機が、その電波エネルギーを受電して電気モーターを回して飛ぶということを示しました。これがMILAXという実験で、世界2例目でした。（図7）



図7

また、世界初の宇宙太陽発電所用の実験棟を京都大学につくってきました。

（ビデオ上映のナレーション）

発電した電気エネルギーをマイクロ波で地上に送る技術です。この技術の研究で世界のトップを走っている国は、実は日本なのです。確実に、そして安全にマイクロ波を受信アンテナまで届ける技術開発が続けられています。日本は、1983年と93年の2回、親ロケットから子ロケットに向け、宇宙空間でマイクロ波送電する実験を成功させています。数々

のデータも収集し、宇宙太陽光発電を一步も二歩も進めてきました。

「技術的には、宇宙太陽発電所という新エネルギーをとる上で何が問題かということ、例えば原理的にこいつはわからんと、これはまだまだ研究の余地があるというようなものは数が少ない。つまり、ほとんど現存の技術の延長線上で物ができると我々は考えているわけです。これがほかの新エネルギーとは違うところです。巨大で、かつそこまで行くのに幾つかのステップはあるけれども、そのステップの大きさがわからないというようなものじゃなくて、確実にわかったステップを上っていけば到達するというものだというふうに考えているんです。（松本談）」

（ビデオここまで）

以上のように、宇宙空間のプラズマ環境下でエネルギーが電波でちゃんと送れるかどうかという問題を理論と実験で研究を進め、模型飛行機実験ではマイクロ波エネルギービームだけで飛ばせるというデモンストレーション実験などをしました。

更に、宇宙に送電機を持っていくとなりますと、出来るだけ軽く製作する必要があります。重さというのは打ち上げ費用に大きく響きますから、出来るだけ軽く作るということが重要です。このことにチャレンジし、世界最軽量のマイクロ波送電器（COMET）を民間との共同研究で作りました。現在、1ワットのマイクロ波を送電するのに25グラムの重さが必要です。私ど

ものターゲットは、これを5グラム以下にしたい。あと5分の1軽くする必要がありますが、現在の数字でも世界最軽量の記録です。

先ほど紹介しましたミラー型の太陽発電衛星では、太陽電池パネルとマイクロ波送電器が一体となった部分の直径は数キロメートルの大きさです。この発電電一体の装置は、40メートルぐらいの六角形のユニットから成り立っています。この40メートル位のユニットを組み立てて大きい発電電装置にするわけです。その六角形ユニットの小さな模型を実験室内に作りました。(図8)

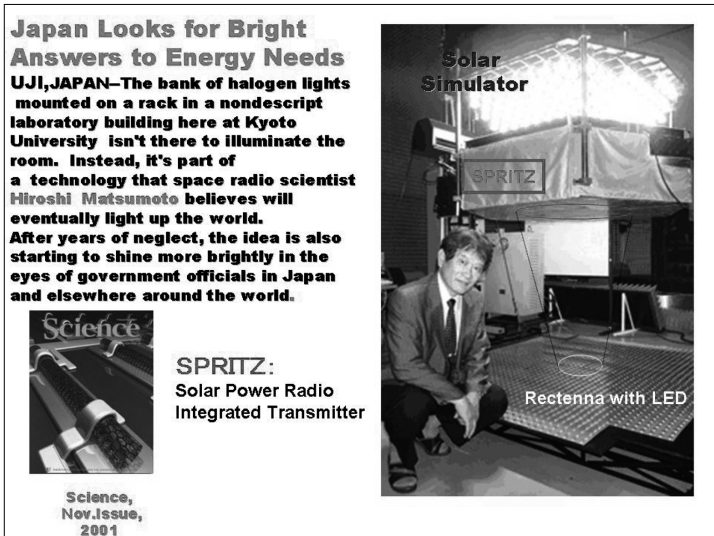


図 8

直径1.2メートルぐらいの小さなユニットです。その上部に取り付けた太陽電池パネルに太陽光を当てますと、この箱の中でマイクロ波が作られ、下面に設置されたアンテナからマイクロ波ビームが出ます。そのマイクロ波ビームで任意のターゲットに正確にエネルギーを下ろすことができます。図中の下に敷き詰めたレクテナ面は地上レクテナ・サイトに対応し、この装置をSPRITZと名付けました。世界初の装置です。

こういうことをやりますと、アメリカという国は非常にエネルギー安全

保障について敏感な国ですので、すぐ取材に来て、京都大学では、こういうことが行われていることが「サイエンス」という雑誌に出ました。日本のSPS委員会にも、NASAから委員が入っていましたが、我々が「NASAの委員会に入りたい」と申し込んでも「あなた方日本人は国の安全保障にかかわる委員会なので委員にはできない」と、拒否されます。そこで、私どもも委員会として、「それじゃ、申しわけないけど、あなた方もお断りします」ということにしました。しかし、実質的には情報はじゃじゃ漏れです。ほとんどのデータが出ていきます。

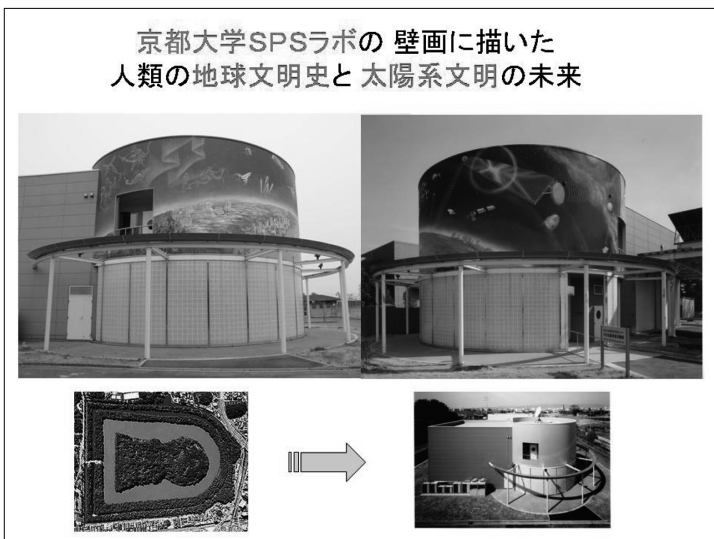


図 9

京都大学では、そういった未来型のエネルギーを研究するために、夢のある実験棟をつくることにしました。政府からお金をもらいまして、学生さんに夢を与えられる日本らしい建物にしようということで、大和の国に固有の前方後円墳の形にしようとして「それらしいものをつくってね」と言って設計してもらったら、何とこんなものができちゃったんです。(図9)

似ても似つかんものですね。ぱっと見ますと、前の部分はガスタンク

みたいで、後室部分は箱形でした。全然夢がないと思いました。これじゃだめなので、円筒部の壁にロマンのある絵を描いてみました。太古、原始人の時代から将来の30世紀までを描いています。その途中に宇宙太陽発電所も描かれていて、この研究をやっているんだよということにしました。たくさんの方が見学に来られます。

SPSのロードマップとしては、2010年ごろから2040年ごろ、30年間ぐらいの間に順番に小さな衛星、中型SPS、大型SPSをつくります。最初の大型SPSは1基1兆円弱（原子力発電所2基分程度）かかりますが、1兆円でできると、1キロワットアワー当たり8円で電力を得ることができます。こういったことを検討しながら技術課題を次々と解決していつているわけです。

ここまで太陽発電衛星の話をしてきましたが、実は私は、電気エネルギーを得るためだけにSPSに情熱を燃やしてきたわけではありません。私は先ほど言いましたように、宇宙船地球号という我々の星が手狭になって、宇宙空間に人類が進出する必要があると確信しています。ヒトの遺伝子の中に、そう書いてあるのかもしれませんが。昔から人類は大空を眺めて星を愛で、宇宙はどうなっていると考えてきましたよね。

これはもうフィロソフィーの問題ですけど、人間というのは優秀な生命体であると思いますが、そのDNAは宇宙から来たという仮説をポーリングというノーベル化学賞をもらった学者が言っています。宇宙胞子説と言うんですけども、時々そうかなと思うこともないわけではありません。太陽系文明をいずれ築かないといけないという差し迫った状況になりますと、1万トクラス小さなタンカーぐらいの発電所を上げられなくて太陽系文明なんかできこないので、まず、地球温暖化の問題で非常に差し迫った喫緊の問題があるので、SPSを上げられる技術を手に入れようじゃないかと考えたわけです。

このような大型建設物を宇宙に作る技術を手に入れますと、それを契機に宇宙農場とか宇宙工場とか、あるいは宇宙で資源を採取するということまで行けます。この時点で宇宙太陽系文明の曙光という時代に差しかかることになります。

太陽系文明へのアプローチですけども、まず一番身近な天体は月です。月の利用ということは当然考えられますが、一般に月に限らず、すでにいろんな惑星に人類の人工惑星が飛んで行って、いろんな調査をします。

宇宙開発の歴史を整理してみますと、宇宙文明へのステップはこうなります。人類は、最初には天体観測をやってきました。それから、地上からの天体観測では十分では不十分なので人工衛星を送ろうということになるわけです。いきなり星まで行って、そこに軟着陸させるというのは非常に難しいので、まず近くを通るフライバイを実施することになります。そのうちに、軟着陸はできないけれども、固い着陸、つまり人口惑星をボーンと衝突させるインパクトミッションをやります。その次は、周辺を回し、ランダーでそっと観測器などをおろす。それからローバーでロボットのようなのを動かす。その後人が行くと、こういう手順になっていて、いずれ恒久的に人間がそこで活動をするというシナリオが大体今までの宇宙開発の手順になっています。

過去の宇宙開発の歴史をちょっと振り返ってみますと、第1世代は人間が最低限居住できる宇宙船（例えばアメリカのジェミー）に入って宇宙に行きました。宇宙に行ったと言っても、実は地球という星の丸い円をギュッと黒板にチョークで書きますと、チョークの太さぐらいの高さでした。400キロメートルぐらいありますからね。毛利さんが国際宇宙ステーションに行ったときもそうですけど、大阪から静岡までの距離を上空に伸ばしたぐらいの高度ですから、

宇宙と言えるかどうかわかりませんが、まあ一応宇宙です。そういった非常に高度の低い領域を飛んだわけです。

ガガーリン少佐というのが最初に宇宙を飛んだ人間ですが、その後、アポロでアームストロングは月まで行きました。このように狭い狭い宇宙船の中で宇宙へ行った時代が第1世代です。

第2世代になりますと、スカイラブという大きな人工衛星が地球を周回するようになりました。次いで、スペースシャトルで数人の人間が宇宙へ行けるようになりました。旧ソ連のサリュートもそうでありました。かなり大きくて17メートルくらいありました。17メートルといいますと、この舞台ぐらいの大きさですかね。そのぐらいの大きさのものが飛べるようになった。これが第2世代です。

第3世代は、ロシアの宇宙ステーション「ミール」が打ち上げられました。全長が32メートルですから、ここからこの会場の半分ぐらいまでの大きなものが上がっております。

現在、世界中の多くの国々が協力して国際宇宙ステーションを作っていますが、これは長さが100メートルです。この部屋のちょっと向こうまでの大きさの宇宙ステーションです。その国際宇宙ステーションに日本の「きぼう」というモジュールが装着されることになっています。日本では土地が高いものですから、なかなか一戸建ての我が家は持ってません。しかし家を持ったなら庭を持つのが夢であります。したがって、この「きぼう」にも小さいながら庭（デッキ）が用意されています。ヨーロッパのモジュールには日本のモジュールにつくデッキはありません。日本の庭（デッキ）でいろいろ実験しようという計画が練られています。

宇宙開発の歴史を振り返ってみますと、1944年にV2ロケットが上がりました。今から60数年前ですね。不思議なことに、たった13年後の1957年には、スプートニクという人工衛星がはじめて上がっています。ミサイルとして戦争に使われたロケットが、13年後には宇宙への進出手段になっています。それからわずか4年後には人類史上はじめてガガーリンが宇宙へ行ったわけです。V2ミサイル開発から数えてもおよそ17年で人間が宇宙へ行けるようになったわけです。

さらに人工衛星が上がってから12年たって、アポロ宇宙船で月へ人間が行きました。さらに12年たった1981年にはスペースシャトルで宇宙への往復ができるようになりました。このように大体大きな宇宙技術革新というのは12年から15年で起こってきたことがわかります。

これは工学の世界ではごく当たり前で、5年間ぐらい基礎的な開発をやって、5年ぐらいテストをして、最後の5年で仕上げをやって次のステップへ行きます。これの繰り返しです。宇宙開発はそういうふうにしておよそ15年ぐらいで技術革新が進んできました。だから、このペースのまま進むと今世紀の初めに国際宇宙ステーションができるはずだったんですが、遅れに遅れています。やっと来年ぐらいに形を整えるんじゃないかと思います。完成は2005年と当初言われていましたが、2007、8年になりますね。場合によったら9年になるかもしれません。

これからの宇宙開発の見込みですが、2020年ごろには100キロワットぐらいの小さな電力衛星が上がるでしょう。2015年には月、火星、水星の科学探査が順調に進んで、実施されると思います。2020年には、10万キロワットぐらいの宇宙太陽発電所の実験ができる。2025年、これはブッシュ大統領も言っていますが、火星に人が送られるでしょう。日本もアメリカからお金を出せと言われる可能性は高いですが、金なんか出さずに自分の技術をちゃんと蓄えるべきだというのが私の主張ですが。

さらに、10年後の2040年には、100万キロワットぐらいのSPSが実現し、月の利用

が始まるでしょう。宇宙工場、農場は、今世紀の中頃から後半ですね。今から50年以上の将来ですけれども、数十人から数百人規模の小さな宇宙の町、いや、宇宙の村と言ったほうがいいかもしれませんが、それが出来はじめ、人類は宇宙へ根を伸ばしていくと思っております。

宇宙に行って実用価値があるのという話をよく考えておかないといけません。ここに地球と月の地殻及び流星物質、隕石の科学組成を比較したのがあります。これはそれを表にしたものです。地球の地殻の大部分は酸素であります。珪素、アルミニウム、鉄、マグネシウム、ナトリウム、カリウム、チタン、ニッケルと続きます。実は、月の地殻もほぼ同じ構成になっています。つまり、太陽系の中の惑星、衛星というのはほぼ同じ元素構成です。したがって、地球上で見つかるものは、太陽系の星でも手に入るということですね。

先ほど言いましたように、いろんな重要な生活物資が足りなくなったら、太陽系の中には、およそ50万倍の資源があると推定されていますから、それを利用するというのが人間にとっての賢い方法ではないかと思えます。



図10

月の地殻をついでに言いますと、チタンだけが地球に比べて多いですね。10倍ですね。月に行って工場をつくれるようになったらゴルフのチタンドライバーが安くできるかもしれません。流星物質の構成もほぼ同じですね。

木星、非常に魅力のある惑星ですが、木星のお月さまの一つにイオというのがあります。イオの表面では火山活動が観察されています。ですから、火山に伴ういろんな資源は当然あるわけですね。

月生活に向けて50年先の日本の宇宙開発をどうするんだという議論をしています。やはり、地球周辺から月面、そしてそのさらに先へ進出するシナリオというものを考えた上で、いろいろ検討する必要があります。

資源利用と、長期滞在、月面拠点、生命維持をどうするか、エネルギーを、先ほどの太陽発電衛星のようなものからどうやって送るか、15日にも及ぶ月の夜にどう対処するかと、水をどうするか、資源をどうするか、太陽からやってくるプラズマからどう守るか、宇宙放射線からどう守るかというような研究が日々行われている現在であります。

月資源利用は、こういうイメージになります。(図10)月の表面というのはレゴリスという砂で覆われています。レゴリスにはヘリウム3という核融合に有用な貴重な資源が含まれています。いずれ、100年、200年、300年たちますと、地球だけではなくて、月、火星といった、割合近場の宇宙の利用は頻繁に進むだろうと想定されます。そういったことをイメージ図で描いたものがこの絵です。(図11)小さな町や村が出来上がっているところです。

先ほども述べましたが、宇宙太陽発電所というのは、近々の地球温暖化問題の解決に寄与する安定的な電気エネルギーの供給源としての魅力もありますが、それだけではなくて、太陽系文明の礎になる技術です。太陽地球系という我々の地球という星が置かれている環境を十分に



## 地球・月・火星系



図11

研究、観測を行い、そこを利用していくという時代がやってくると思います。それを太陽系文明の時代というふう呼びたいわけです。そうなりますと、100億人ぐらいは地球にへばりついて地球型人間として生きていくでしょう。太陽系の中に非常に広大な地域に人類が進出できれば10兆人ぐらいの宇宙型ホモサピエンスが活躍するんじゃないかと思います。西暦3000年ぐらいで、そうなっているんじゃないですかね。まあ1000年先ですから大したことは

ありません。すぐです。

そうなる、どうなるかというのをよく質問を受けるんですけど、宇宙に行くと無重量状態になります。人間の心臓は体この辺にありますから、地上では地球に引っ張られているのでちょうど頭と体で体液分布がバランスしているんですけども、引っ張られなくなったら上へ上へと血液とかリンパ液とかが行きますので、頭がでかくなって、重力に抗する必要がありませんから、足が細くなります。こんな形になって、典型的にいますと、このような火星人のようになるわけです。ここまでいかないと思いますけれども、変形はして適応化していくと思います。重力場がないわけですから、心臓病なんか割合いいかもしれませんし、動くのも足が別に強くなくても、この辺をちょっと押せばすーっと移動できて楽ですね。もちろん、そんなのは嫌だという人がたくさんおられますから、回転系で人工重力をつくるということになると思いますけど、そういった技術課題は当然検討していく必要があると思います。

以上、太陽系文明の話をしたんですが、やっぱり人間ですから、身の回りのことが大変気になります。これは私と私の孫を描いてあります。間違わないでください。女の子です。生まれたときに男の子かと思いましたが、40年の差です。この二枚の写真を重ねてみますと、ぴたっと目や鼻、耳の位置が合うんです。こんなに合うのは、遺伝子のなせるわざかなと思います。遺伝子というのは怖いなとも思いましたね。

そういう遺伝子の研究から宇宙の研究まで、幅広いことが現在行われております。私的なことを申し上げて申しわけなかったんですけども、言いたいことは、現在の科学というのは現在だけを見てはいけません。端的に言いますと、子どもたちのため、孫たちのために投資をする必要があるということです。したがって、科学技術に「高いね。あんなものむだ金や」と言わずに、科学技術こそが人間の将来を切り開くんだという信念で、ぜひ皆様方にも政府に働きかけていただいて京都大学にお金が来るように言っていただきたいとお願いしたいところです。

当面の1000年間は太陽系の開拓ということを夢見て研究をしてまいりました。本日はその一端を述べさせていただいて、私の講演にさせていただきました。どうもありがとうございました。(拍手)

終わり