

宇宙開発・宇宙科学と私たちの暮らし*

—— 元気の出る宇宙生存圏開発 ——

松本 紘**

1. はじめに

人々の多くは、今の生活がいつまでも続くような錯覚に陥っています。しかし、実はこの地球上の文明の行く先は百年くらいのスケールでは、決して明るいものではありません。増え続ける人口と、向上を続ける生活レベルのために、いろんな意味で地球は手狭になりつつあります。資源、エネルギー、食糧および空間はいずれも急激に不足し、遠くない将来に醜い争いが起こり、人類の滅亡もしくは大悲劇が起こる可能性は少なくありません。つまり、私たちのみならず、私たちの孫子の暮らしに直接関係するこれらの問題を解決するには、地球という閉鎖系から、地球以外の領域も含めた開放系、たとえば太陽系全体に目を向ける必要があります。つまり、人間が生き残ってゆくためには、早晚、人類の英知を傾けて宇宙開拓に真剣に取り組まなくてはならないのです。

本講演では、近い将来の宇宙開拓の実現を念頭に置いて、私たちが取り組んできた電波を中心とした宇宙実験や計算機実験と研究の一端をご紹介します。

2. 地球文明と宇宙

宇宙というと、みなさんはどんなイメージを持ちますか。星を散りばめた濃紺の空間でしょうか、あるいはブラックホールや暗黒空間に浮かび上がる輝く銀河イメージでしょうか。これらは、はるかに遠い宇宙のイメージです。宇宙論や天文学はそんな「遠い宇宙」を対象とし、真実と夢を追っています。これらの「遠い宇宙」は「ユニバース・(Universe)」または「コスモス (Cosmos)」とか呼ばれています。

一方、宇宙開拓が対象とする宇宙はもっと「身近な宇宙」です。人類として初めて宇宙に飛び出したガガーリンの活躍した宇宙も、向井千秋さんが翔んだ宇宙もわずかに東京、大阪間くらいの距離を上空に伸ばした「近場の宇宙」にすぎなかったのです。実用衛星が活躍する静止軌道でも東京、リオデジャネイロの往復距離くらいしかありません。これらの身近な宇宙は遠い宇宙と区別して、「スペース (Space)」または「宇宙空間」と呼んでいます。現在は「スペース」の定義は人間が探査機などを送り、直接測定できる領域とされています。現在は米国の惑星探査機ボイジャーが太陽系の辺境まで達していますから、当面、スペース（宇宙空間）は太陽系全体を指すと考えていいでしょう。スペースサイエンスや宇宙開拓が対象としているのはこの「近場の宇宙空間」です。そこはもはや夢の世界ではなく、現実に惑星探査や工学的な宇宙利用が実行に移されてきている世界なのです。

1957年の初の人工衛星の打ち上げ以来、急速に人々の眼が宇宙に向けられ、いわゆる「身近な宇宙」の時代が始まりました。わずかに40年ほど前のことです。宇宙と人間の関わり方の変化は初期のころは非常に遅く、近年に近づくにつれ加速度的に速くなってきています。非常に荒っぽい数字で、人間の歴史を撮り返ると表1のようにまとめることができます。

* 2005年9月25日作成

** 京都大学副学長 兼 生存圏研究所教授

表 1 加速度的な地球文明の進歩

400 万年前	人類祖先の誕生 原始生活
10 万年前	移動狩猟生活
1 万年前	定住農耕生活
3000 年前	文明の発祥
500 年前	船舶時代・非動力生活
200 年前	産業革命・動力生活開始
100 年前	航空機時代開幕・電力生活開始
40 年前	宇宙時代開幕・コンピュータ生活開始

古代から現代に至るまで、人の生活と意識の中にいつも宇宙が存在し、真理の探求の原動力にもなってきました。しかし、宇宙の意識は、宇宙時代に入って人々の心のなかで確実に変化してきています。そもそも生まれおちたときから宇宙実用衛星の恩恵を受けている子どもたちにとっては、宇宙はもはや夢物語の世界ではないはずです。来世紀を背負う彼らにとっては宇宙は現実の世界であり、近未来の具体的な活動の標的となってきています。事実、気象衛星、通信衛星などはお茶の間の日常生活の一部となっています。気象衛星から送られてくる雲の動きの連続写真を見れば素人でもほぼ天気予報できるようになりましたね。ベランダや屋根の上で宇宙を見上げている小さなパラボラアンテナが宇宙からの電波を受け、衛星放送（BS）を受信しています。ビジネスの世界では通信衛星や海事衛星が国内、国際通信や船舶通信に活躍していますし、予備校ネットワークやスーパーマーケットのチェーン店の連絡網、トラック輸送の連絡にも衛星電波が利用されはじめています。さらに地球観測衛星や資源探査衛星は宇宙から地球資源の探査や農林水産の収穫予想などに活躍しています。航空機や自動車などの移動体が自分のいる位置を知るのに便利な測位、航行衛星（GPS）は地球を周回している衛星群です。宇宙（スペース）は確実に身近になりつつあります。

3. 宇宙船「地球号」の危機

人類が地球上の生物の冠たる地位を築き、今日の繁栄にいたったのはなぜでしょう。人類の繁栄の基盤は、(1) 物・食糧、(2) エネルギー、(3) 領土・空間、(4) 人口、(5) 知識・技術の 5 つの量を次第次第に拡大しながら入手してきたからだとされています。第一の「物・食糧」、第二の「エネルギー」を次々と手に入れていつて人々が生活を向上させてきたのは明らかですね。第三の「領土・空間」の拡大は農地、工業用地、住居地などの人々の活動空間、生産空間の増大をもたらしました。しかし、以外と見落とされがちなのが第四の「人口の増加」です。人の数が実は重要な成長の要因であったということです。人口の増加は、労働力の増加、社会活力の増加を通して、明らかに人類の繁栄に貢献してきましたね。知的発見も人口に対し一定の割合でなされていますから、明らかに人口の増加が知的生産物に対し大きな貢献をしてきているのです。

しかし、5 番目の「知識・技術」を除けば、いずれも無限に増やしてゆくことは出来ません。この限界が実は深刻な問題なのです。惑星「地球」のこのような危機は専門家の間では随分前から認識されており、警鐘も打ち鳴らされてきました。しかし、あまり顧みられることはありませんでした。最近のジャーナリズムの啓発活動や政治レベルの環境問題への取り組みのおかげで、ようやく広く一般の国民にも、「病める地球」の問題の重大さが少し認識されるようになりました。それでもなお、人類の未来と一蓮托生の惑星「地球」に忍び寄る破滅の暗い影は、いまだ人々に真剣に安け止められてはいません。

1972 年にローマクラブがこの資源・食糧・エネルギー・空間などの有限性のために、人間社会の経済成長はいずれ止まるという警告を発しました。その翌年に第 1 次のオイルショックが襲ったため、この警告は深刻に受け止められました。日本では第 1 次、第 2 次オイルショックで、トイレットペーパー騒ぎなど

が起こり、テレビの深夜放映の自粛や夜のネオンサインの消灯などエネルギー節約がやかましく言われました。しかし、熱しやすく冷めやすいのが日本人の国民性でしょうか、今ではさっぱり節電の努力は行われていないように見えます。実は、この「成長の限界」の意味は経済成長が止まるというだけではなく、もっと深刻なのです。いくつかの問題を考え直してみましょう。

3.1 人口爆発

人口は繁栄の結果でもあると同時に繁栄の原動力でもあります。図1は紀元後の2000年間の人口推移をグラフにしたものです。この図からわかるように、18世紀まではおよそ2～3億人程度の人口にとどまっていた。注意したいのは、戦争のために10パーセント以上も人口が減ったということはないということです。自分の親類縁者に戦死者がでるともうごめんだという自制心が働くようです。一方、増えるほうには自制心はなかなか働きません。産業革命の起こった18世紀から後には、世界の人口は急激に増加の一途をたどっています。その人口増加の仕方はまさに爆発的です。この人口増加の曲線は、数学的には指数関数曲線になっています。人口の増加の仕方は、そのときの人口に比例すると単純に考えると簡単な微分方程式の答えとして指数関数が得られます。産業革命以前に、指数関数的に人口が増えなかったのは、人口の増え方が単純にその時の人口に比例するのではなく、病気、災害や飢饉などのいろんな要因で人々が亡くなっていたからです。産業革命以後の人類の生活安定が人々の死亡率を低下させ、理論どおりに人口爆発が生じたまでのことです。

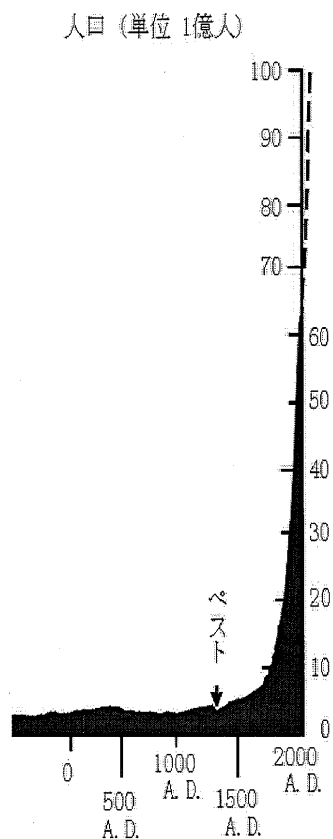


図1 世界の人口推移と人口爆発

現在の世界の人口はおおよそ60億人と堆走されています。それも時々刻々増えています。現在の世界平均の人口増加率はおおよそ2%弱ですから、一秒間に3人以上も増え、一年間に1億人ずつ増えていることに相当します。おそろしい勢いで人間がこの地球上で増殖しているのが分かりますね。

科学技術を駆使して、直面している人口爆発を抑える努力をすべきことは当然ですが、よほどうまくし

ないと人口の減少は社会不安を引き起こしたり、社会の沈滞を生み出すので得策ではないでしょう。50年、100年というスケールで考えると、やはり今の人口の2倍や3倍の人口が地球上にひしめくようになるのは避けられそうにもありません。そうなれば、資源やエネルギー源をめぐる、開発途上国と先進国との間の深刻な南北問題や、国家間のエゴのぶつかり合いなどが起こって、醜いそして致命的な争いが人類を覆いつくし、やがて人類が滅亡するという悲しい予測すら可能です。うまく争いが避けられても、富と資源を増えつつける人類で分かち合うわけですから、いわゆる生活水準（生活の質）は来世紀には下降の一途を辿ります。事実、地球外の資源やエネルギーを導入しないと、世界の生活水準（生活の質）が来世紀末には現在の半分以下に落ち込んでしまうというシミュレーション結果も発表されています。やはり、争いなく増大する人口と向上する生活水準を保ちながら、人類が生き続けられるような道を模索しなくてはならないでしょう。このためには、100年のスケールで宇宙へ進出するしか方法はないように思います。

3.2 エネルギー問題

21世紀のエネルギー事情はどうなるでしょうか。世界の人口が増え、さらに一人一人が使うエネルギーも確実に増えています。お隣の中国の沿岸では、経済成長率は10%を超えており、ベトナムでは13%という驚異的な経済成長率で経済が伸びており、世界のエネルギー消費は猛烈に増えていますね。我が国においても電気エネルギーの需要は依然として毎年3パーセント以上の伸び率を示しています。しかし現在の主要エネルギー源である石油の埋蔵量は早くも21世紀の半ばには枯渇してしまいます。このままでは近い将来に深刻なエネルギー危機が我々を襲い、経済的、社会的パニックに陥る可能性が高いのです。この解決のために石油に代わるエネルギー源を求め、石炭の見直し、原子力発電の普及、熱核融合発電の開発などが現在真剣に行われています。しかし、石炭は石油と同様に炭酸ガスを大量に発生し、温室ガラスのように地球をすっぽりと覆い、いわゆる温室効果を生み、地球全体の気温の上昇を招きかねません。原子力は有望なエネルギー源ですが、立地問題や放射性廃棄物の問題を抱えています。熱核融合も未解決の技術問題が多く、すぐにはエネルギー源として期待できそうにありません。そこで、大型でクリーンなエネルギー源として24時間運転できる宇宙太陽発電が有望な電気エネルギー源と考えられるようになりました。いずれ、宇宙進出が避けられないのであれば、現在のエネルギー不足を補い、宇宙開拓の礎となる宇宙エネルギー基地（宇宙太陽発電所）を実現することは、まさに一石二鳥ではないでしょうか。ここにも宇宙開拓の必要性があるのです。

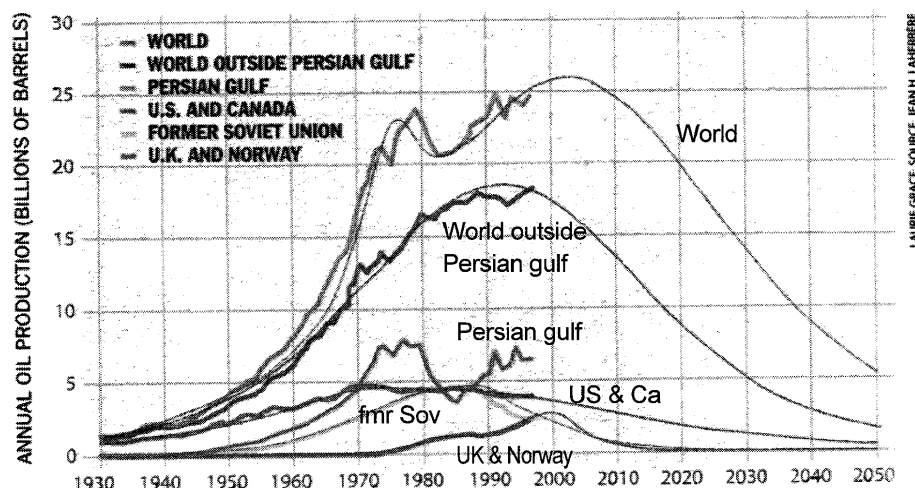


図2 Colin J. Campbell と Jean Laherrere による最新データに基づく石油埋蔵量の Hubbert 曲線 (Scientific American '98/3 月号)

3.3 免罪符となつてはいけない地球環境対策

地球環境サミットに象徴されるように、近年「環境問題」が人々の関心を呼んでいます。事実、地球環境の科学的調査にも研究費が多く傾かれるようになっていきます。確かに資源リサイクル、森林保護、大気汚染防止、オゾン破壊物質使用禁止、省エネ対策など努力すべきことは多いのです。しかし、このような努力も急速に悪化している人口爆発、食糧危機、耕地砂漠化、資源枯渇や深刻なエネルギー不足の前には「焼け石に水」ということを認識すべきなんです。科学調査も環境問題の根本的理解には必要ですが、観測だけでは環境悪化を止めることはできません。何か、根本的に瀕死の地球を救う具体的な手だてを考えねばならないのです。人類にとって「ゆりかご」の役目を果たしてくれた地球は、このままでは墓場になりかねません。たとえ人口が増えなくとも、世界の人々が日本人並みの生活をするようになれば、たちまち地球は破産なのです。今、世界平均で人は一人当たり 1 トンもの化石燃料を消費しています。そんなに猛烈消費をする人間が、瞬きする間に一人ずつ増えているのです。冷静に考えれば、現在の環境対策や新産業革命だけでは人類は救えず、結局人間の活動する器を地球から太陽系に広げざるを得ないことに気づくでしょう。地球環境問題の重視や環境に優しい対策がこれらの問題を解決してくれる、と人々に錯覚をさせてしまうとかえって罪作りです。この点では、環境対策は下手をすると中世の「免罪符」のようになりかねません。このように悪化している地球環境はまさに人類の経済活動、生活水準の向上の裏返しです。現在、行われている「環境」と名の付く研究の大部分はいわば、病める地球、病める人間文明の病気の「診断」をしていることに対応するでしょう。病名が宣告されただけで、治療がなされなかったら、本当の手当てとは言えませんね。診断と同時に「治療」の研究も同時に行わなければいけないのです。手遅れになる前に、今こそ何が根本的に必要なのか、どうすれば「病める地球」を根本的に「治療」できるのかという問題を真剣に考えると、何故今「宇宙開拓」という「治療」に急いで取りくまなければならないのかが分かるでしょう。

4. 宇宙開拓の合理性—太陽系を食べる—

人間が来世紀に生き残ってゆくためには、人類の英知を傾けて宇宙開拓に真剣に取り組まなくてはならないことは前に述べました。幸いなことに地球が手狭になってきた 20 世紀の後半になって、人類は地球の重力圏外の世界に出てゆける宇宙ロケットをタイミング良く手に入れましたね。また、地道な科学研究によって着実に地球の近くの宇宙空間の知識も増えました。宇宙技術というとすぐにロケットやスペース・シャトルなどの飛翔体技術を思い浮かべる人が多いのですが、実は宇宙技術は、宇宙航空工学以外に、電子工学、電波工学、計算機工学、材料工学、機械工学、化学工学などはもちろん、土木工学や建築工学までもが必要とされる総合技術なのです。これらの技術を総合的に駆使して宇宙開拓に取り組むことになります。しかし、「宇宙開拓技術」の開発の前に宇宙空間科学、惑星科学、プラズマ科学、流体力学、材料科学、宇宙医学、宇宙生物学などの「宇宙科学」の基礎が確立されていなければなりません。その意味で、宇宙科学は宇宙開拓の先発隊と言えるでしょう。知識なしに、宇宙というとてつもなく大きい目標に船出をするのは、風車に向かって槍一つで突入するドンキホーテのようなものです。この意味で、宇宙科学は夢と知的好奇心を追う学術と評されがちですが、実は宇宙科学の果たすべき役割は重く、實際上重要なのです。

地球の扶養限界を打破しながら、ゆるやかな成長をし続けるには、宇宙への進出がたった一つの解決法であると私は信じています。今までの歴史がゆっくりと進んできたのに対し、現在世界中で進行しているエネルギーの消費爆発、資源の猛烈消費などは、まさに過去の歴史になかった速さですから、「今まででなんとかやってきたから大丈夫だろう」という考えは全く通用しなくなることは火を見るより明らかです。

でも資源は宇宙に十分有るのか、エネルギーは十分有るのかという疑問が当然湧いてきますね。その質問に対する答えはイエスです。地球は太陽系の第 3 惑星です。その地球の構成元素の割合は鉄がもっとも多く約 40%、ついで酸素が 28%、珪素が約 15%、それ以下はマグネシウム、ニッケル、カルシウム、アルミニウムと続きますしかし、鉄やニッケルやマグネシウムは地球物質の大半 (67%以上) を占めるマント

ルに豊富に含まれています。これに対し、私たち人類が利用してきた地殻に含まれる元素は、酸素が約 50%、ついで砂の主成分の珪素が約 26%、そしてアルミニウムが 7%、鉄が 4%、カリウム、マグネシウムが約 2%と続いています。もっとも地球に近い月の地殻の組成比はどうでしょうか。実は驚くほど地球の組成比と似通っています。地球と火星の間に小惑星群があることは良く知られていますね。その小惑星の組成比も似たものです。つまり、太陽系の惑星とその衛星、小惑星などを利用すれば、ほぼ地球上でこれまで人間が利用してきた鉱物資源は太陽系の中にふんだんに存在するわけです。エネルギーについては、太陽の熱、光を利用すれば無尽蔵に得ることができます。つまり、太陽系を人類が食べるのに成功すれば、少なくとも 30—40 世紀までは人類の文明の発展が期待できます。

5. 宇宙でのエネルギー確保

地球の上では電気エネルギーはもうすぐ先進国でも不足します。石油や石炭を燃やして発電する化石燃料発電は現在の発電方式の主流を占めますが、石油の資源が 40 年しかもちません（図 2 参照）。しかも、石油はいろいろな化学工業製品に必要ですから燃やしてしまうのは愚かなことです。さらに、石油や石炭を燃やせば、亜硫酸ガス、亜硝酸ガスや炭酸ガスが発生します。脱硫や脱硝装置を完備しなければ、酸性雨の原因にもなります。炭酸ガスやメタンなど、いわゆる温室効果ガスは地球の温暖化をもたらします。地球の温暖化や酸性雨は今後の人類の生活に多大の影響を与えることは必至でしょう。したがって、これらの化石燃料への依存性は減らしていかなければなりません。一方、原子力発電は、不足する電気エネルギーを補うのに多くの国で使われています。日本ではほぼ 1/3 の電気エネルギーが原子力発電によって賄われていますね。しかし、チェルノブイリやスリーマイル島で起きた事故のような放射能漏れ、核廃棄物の処理の問題などを抱えています。

この地球上のほとんどのエネルギーは大本をたどれば、太陽に行き着きます。石油や石炭は長い時間をかけて太陽エネルギーを形を変えて蓄えたものを使っていることになります。また、水力発電も太陽が引き起こす大気と陸地の間の水の循環が源ですね。事実、太陽は莫大なエネルギーを太陽系全体に放出しています。地球の軌道上で 1 平方メートル当たり、1.37 キロワットのエネルギーを受けています。この値は太陽定数と呼ばれています。太陽と地球間の距離は 1 億 5 千万キロメートルですから、それを半径とする太陽をすっぽり囲む球を考えて、その全表面を通過するエネルギーの流れは簡単に計算できますね。その球の全表面積はおよそ 2,800 億平方メートルの 1 兆倍もあります。したがって、3,900 億キロワットの 1 兆倍ものエネルギーが太陽から太陽系全体に放射されています。地球に降り注がれている太陽エネルギーだけでも、太陽定数に地球の断面積の 130 兆平方メートルを掛けると、175 兆キロワットもあります。現在人類は 100 億キロワットも使っていませんから、太陽の全放射エネルギーの 40 兆分の 1 程度、地球に降り注ぐ太陽エネルギーの 1 万 5,000 分の 1 のエネルギーしか使っていないことになりますね。

宇宙に出れば、曇りの日も、雨の日も、昼も夜もないわけですから、24 時間、年中太陽エネルギーを利用することができます。現に、ほとんどの人工衛星は太陽電池を広げてエネルギー源としています。2004 年に打ち上げられる国際宇宙ステーションでもそうです。宇宙で太陽光または太陽熱を使って発電する。宇宙発電所（SPS；Solar Power Station；図 3 参照）もそんな考えに立脚しています。宇宙に超大型の太陽電池パネルを展開し、クリーンな電気エネルギーだけを地球に伝送しようというのが宇宙太陽発電所計画です。1 基あたり 2,000 万キロワットを発生する発電所 60 基を静止軌道上に打ち上げ、アメリカ合衆国の全電気エネルギーをまかなおうというのが最初の提案でした。原子力発電所の最大級のものが 100 万キロワットの出力ですから、SPS 一台で原子力発電所の 10 基以上の電力が得られることになります。

当研究所も宇宙太陽発電所にとって重要な技術要素であるマイクロ波による電力伝送の基礎研究に取り組んでいます。ご覧ください。図 3 は宇宙太陽発電所の概念図と私たちが世界に先駆け成功させた MINIX というマイクロ波エネルギー放射のロケット実験の絵です。

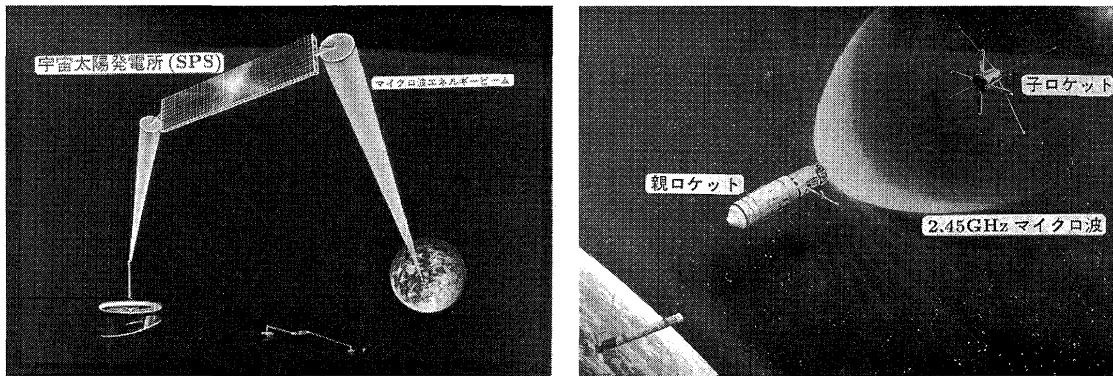


図3 SPS の概念図(左図)と MINIX ロケット実験(右図)

講演では、以下の項目についてお話をいたします。

- (1) マイクロ波電力伝送の研究の歴史
 テスラ（百年前）から現在まで
- (2) 宇宙太陽発電所の概念
 SPS 概念の特徴はつぎのようにまとめることができます。
 （イ）エネルギー源は無尽蔵，無公害，クリーン，かつ無料
 （ロ）一年中，昼夜の区別なく利用可能
 （ハ）超大電力の供給が可能。基幹電力システムとしての使用可
 （ニ）国際市場に供給可能
 （ホ）エネルギー問題，環境問題に貢献
 （ヘ）人類文明の宇宙空間への発展の重要な一里塚
- (3) 宇宙太陽発電の要素技術
 （イ）発電（太陽光から直流電力へ）
 （ロ）マイクロ波への変換
 （ハ）マイクロ波送電
 （ニ）受電用レクテナ

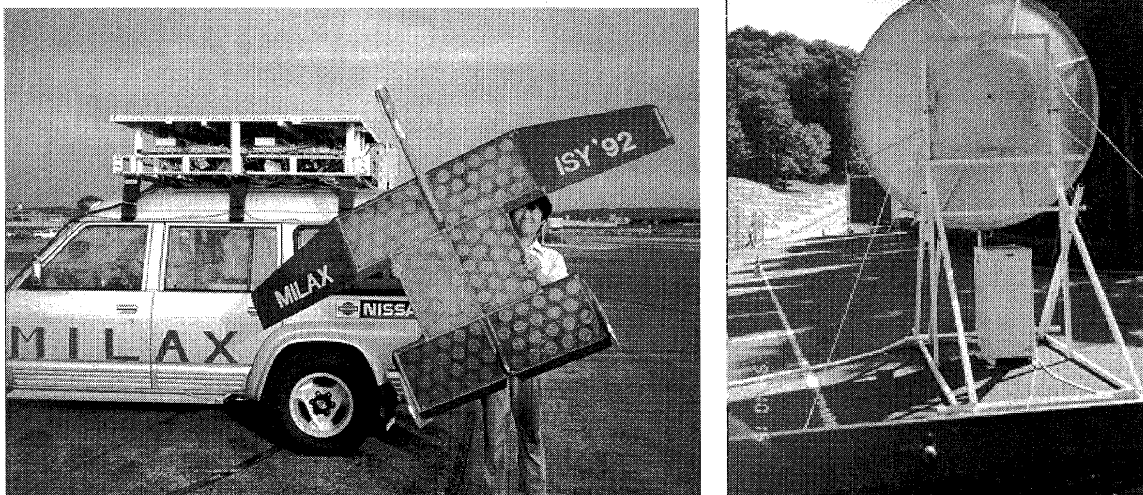


図4 MILAX 飛行機実験(左図)と地上2 定点間マイクロ波送電実験(右図)

- (4) 当研究所を中心とした日本の宇宙太陽発電所とマイクロ波送電の研究
- (イ) 大電力マイクロ波と電離層プラズマとの相互作用の理論研究 - 非線形プラズマ物理学 -
 - (ロ) MINIX ロケット実験 (図 3 参照) - 世界初の宇宙実験 -
 - (ハ) エネルギー送電用レトロディレクティブ方式の開発 - 7 素子フェイズド・アレイ送電機 -
 - (ニ) 無燃料マイクロ波飛行機実験 - MILAX - (図 4 参照)
世界で 2 例目、アクティブ方式では世界初の実験
 - (ホ) 地上 2 点間の無線送電試験 (図 4 参照) - 世界で 2 例目 -
- (5) マイクロ波による電力輸送の技術的課題

6. 宇宙プラズマの世界

昔は宇宙は恒星や惑星以外は真空の世界と考えられ、太陽系空間も太陽を巡る 9 つの惑星とその衛星群、小惑星、彗星微粒子以外の空間は何もない真空世界と思われていました。磁気嵐やオーロラは、ときどき太陽から放出された高エネルギー荷電粒子が真空中を走り抜け、地球を装って引き起こされると考えられていたのです。しかし、今から 40 年ほど前にこの真空宇宙の考え方は誤りで、太陽風と呼ばれるプラズマの風が常に太陽から吹き出て、太陽系を満たしながら吹き抜けていることが明らかになりました。最初この事実は、太陽系を走り抜ける彗星の尾が、運動の方向とは逆向きの尾以外に、太陽から反対方向に伸びる尾も持っているという地上からの観測事実によって明らかにされました。ついで理論的に太陽から定常的にプラズマの風が吹き出ることが米国のパーカー博士によって証明されました。その後、米国の人工惑星マリナー 2 号が太陽風の存在を証明したのです。太陽系の外側では銀河風と呼ばれるプラズマの風が吹いていて太陽系をすっぽりと銀河プラズマが包んでいると考えられています。真空宇宙からプラズマ宇宙へ宇宙の見方がすっかり変わったのです。

このように太陽系の広大な空間を埋めているプラズマとは一体どのようなもののでしょうか。物質にエネルギーをつぎ込んでゆくと、ちょうど水という物質が「氷」、「水」、「水蒸気」と状態を変えてゆくように「固体」、「液体」、「気体」へと状態を変えてゆきます。気体状態にさらにエネルギーをつぎ込むとどうなるのでしょうか。ついには物質を構成している分子や原子の中の電子が剥がされ（これを「電離される」と言います）、プラスの電荷を持つイオンとマイナスの電荷を持つ電子とに別れた「プラズマ」と呼ばれる第 4 の物質状態に変わります。プラズマとは原子がイオンと電子にばらばらになった状態なので、電気を通しやすく、磁場の影響を受けやすい性質を示します。そのためプラズマの世界ではさまざまな電磁気現象が支配するようになります。

有名なノーベル賞学者のハネス・アルフヴェン博士は「全宇宙の全物質は 99.9 パーセント以上がプラズマ状態です」と言っています。全宇宙の中で私たちの棲む地球のように固体、液体、気体という電離されていない状態は非常に少ないのです。私たちの母星「地球」の表面から大空に向かってどんどん昇っていけば、100 キロメートルの高度くらいからもうプラズマの世界が始まります。100 キロメートルと言えば、京都から名古屋までくらいの近場です。近場の宇宙の利用を考える上でもプラズマ宇宙の理解が必要なが分かるでしょう。したがって人類の宇宙進出には、このプラズマ世界の理解を得るために宇宙科学の進歩が必要となっているのです。

まず、地球周辺のプラズマ環境を概括してみましょう。地球は太陽表面からおよそ 1 億 5 千万キロメートル離れた所に位置する太陽系の第 3 惑星で、大気と水を持つユニークな星です。大気や水は地球の表面に固有の環境を規定しています。しかし、そんな地表、海、大気層は、紙の上に鉛筆で直径 5 センチメートル位の地球の円を描くと、0.4 ミリメートルの幅に入ってしまいます。私たちはその鉛筆の線の太さくらいの地球の大気層の、そのまた下で暮らしているわけです。この 0.4 ミリの幅は実際の地球大気では 100 キロメートルくらいの高さに相当します。

高度 100 キロメートルくらいから 1,000 キロメートルくらいまでは「電離圏」と呼ばれる領域です。ここでは地球の大気の成分が太陽の紫外線によって電離され、プラズマになっています。そこでのプラズマ

の粒子密度は最初、高度とともに高くなってゆき、300 キロメートルから 400 キロメートル位の高度で最大に達し、1cc 当たり百万個のイオンと電子のペアが存在します。(ちなみに、地上の空気中にはおよそ 1cc 当たり 3, 000 京個の分子が存在しています。) この領域は電離圏 F 層と呼ばれ、短波帯の電波を反射し、遠距離短波通信に役立っています。F 層からさらに上に行くと、プラズマ密度は徐々に減ってゆき、1, 000 キロメートルで 1cc に一万個くらいになります。この空間は、秋山さんの乗った旧ソ連のミール宇宙船や毛利さんや向井さんがスペースシャトルで乗って翔んだ空間です。最近流行しだした車のナビゲーションシステムに使われている GPS 衛星群が飛び交っているのもこの宇宙空間です。ここはまた電子ビーム放出実験やテザー実験などいろいろな宇宙実験が行われている空間でもあります。

さらに高度を上げてゆくと、電離圏の外側には「磁気圏」と呼ばれる空間が広がっています(図 5 参照)。その名前の由来は、その領域のプラズマの電氣的挙動が地球磁場の磁気で支配されているからです。ここではプラズマ粒子どうしの衝突効果はほとんどありません。磁気圏には地球大気が紫外線で電離されてできた電離圏起源のプラズマと先に述べた太陽風起源のプラズマとが混在しています。電離圏起源のプラズマは、電離圏から拡散によって磁気圏へと上に向かって広がったものです。これに対し、太陽風起源のプラズマは「カスプ」と呼ばれる極地方の太陽側にある一種の穴から直接に入るものを除けば、大部分は図中の「磁気圏尾部」から太陽風とは逆向きに夜側から地球に向けて逆流してきています。その一部は地球に近づくにつれて加速され、エネルギーを得て「バン・アレン帯(放射線帯)」として貯められています。

「磁気圏」の大きさは太陽風の強さによって変動しますが、平均的には昼間側で地球半径のおよそ 10 倍です。磁気圏の中の地球磁場はだいたい双極子(ダイポール)磁場の形をしています。一方、夜側の磁気圏は図に示したように、地球磁場はずっと引き延ばされ、双極子(ダイポール)磁場の形からはおおきくずれています。およそ地球の半径の 10 倍くらいから遠方ではちょうど「吹き流し」のような恰好をしています。この尻尾の赤道面には「プラズマシート」と呼ばれる熱いプラズマが存在して、その中の電流がプラズマシートの南北の磁場の向きを変えています。この地球の尻尾がどこまで伸びているのかはよくわかっていません。この尻尾も太陽風の状態で大きく変動しています。現在、日本の科学衛星「GEOTAIL」はおよそ 150 万キロメートルの彼方まで旅をしてこの尻尾の領域を探索しています。この衛星は日本の文部省宇宙科学研究所が作り、米国のロケットで打ち上げました。私たちの研究室もこの衛星と深くかかわっていて、プラズマ波動の観測機を GEOTAIL に搭載し、私は主任研究員として研究室の若手研究者、大学院生、関係大学の共同研究者、米国の共同研究者と一緒に、得られたデータの解析を進めています。次々と新しい発見があり、関係者は毎日興奮しています。

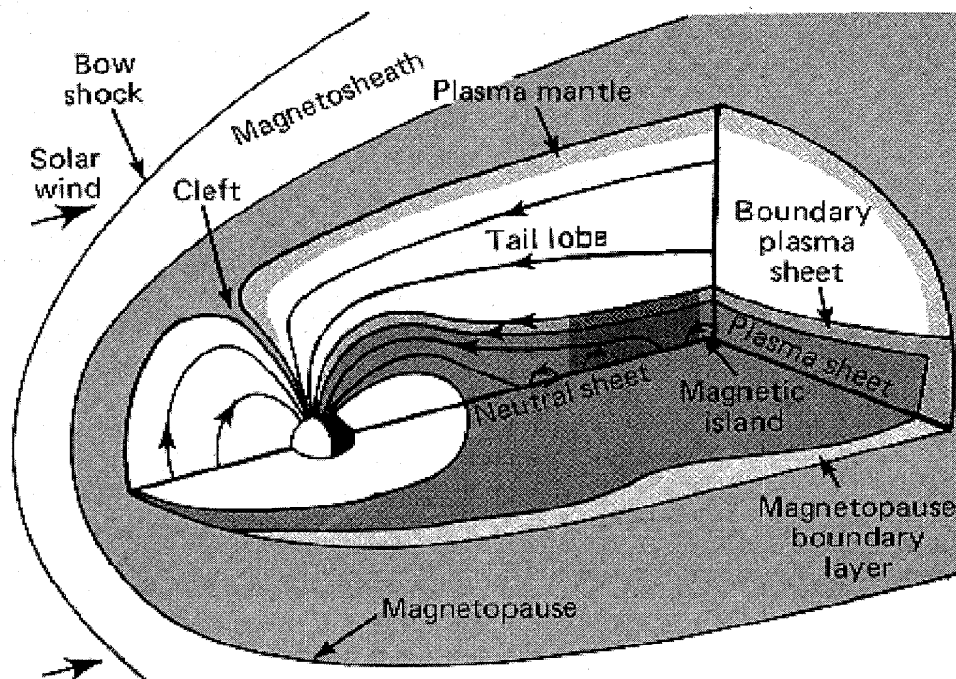


図5 地球周辺の電離圏・磁気圏の模式図

7. 宇宙実験とコンピュータ実験

宇宙空間の知識は、人工衛星や人工惑星に搭載された科学観測機器のもたらす情報で大きく進歩しました。これらの衛星は、耳をすまし、目を見開いて宇宙空間の出来事をつぶさに報告してくれます。プラズマや大気が発するわずかな光を捕らえる高感度カメラ、プラズマ世界の電波を捕まえるアンテナ、高エネルギー粒子をカウントするセンサー、絶えず変動する磁場をモニターする磁力計などが目であり、耳なのです。これらの観測は一種の宇宙実験には違いありません。しかし、衛星は広大な空間のほんの一部の領域しか観測できない上、自然現象は気まぐれで、いつ、どこで、なにが起こるかわかりません。したがって、観測された衛星データを解析するだけではなかなか宇宙空間で起こっている物理現象の全貌は掴みきれません。さらに衛星で観測されたデータをテレメータで地球まで送れる情報量にも限りがあります。そこで、観測以外に、次に述べるこつの試みが行われてきたのです。

一つは、自然現象が起こるのをじっと待つ「まちぼうけ」方式の観測実験から一歩踏みだし、積極的に宇宙プラズマに人工的に刺激を与え、その反応を見ようとする「ちょっかい方式」の宇宙実験です。自然現象を辛抱強く待つ方法は「受動的実験」と呼ばれ、積極的に働きかける実験は「能動実験」と呼ばれます。「能動実験」には電子ビームやイオンビームを発射したり、強い電波を発射したりして、プラズマを刺激します。こうすることによって、プラズマがどんなふうに反応するかを見れば、原因と結果がはっきりしていますから宇宙プラズマのなかで起こる物理現象をつぶさに研究できると言うわけです。図6（左図）は日本人として初めてシャトル実験を行われた、故大林教授の SEPAC と呼ばれた電子ビーム放出実験の模式図です。私たちも、宇宙科学研究所の観測用ロケットを使って、いろいろな能動実験をしたことがあります。そのうちのいくつかは講演で紹介します。アメリカではビームや電波以外に、テザー（はしけ紐）と呼ばれる非常に長いワイヤーをスペース・シャトルから伸ばして、その先っぽに人工衛星を結びつけた「テザー衛星」実験（図6の右参照）を行っています。地球磁場を長いテザー電線が横切って動くと、ちょうど発電機の磁石のなかをローターという電線が横切って回ると、その電線に電気が流れるのと同じで、テザーが発電作用を持つことを利用した能動実験です。私たちの研究室でもアメリカの依頼を受けて、テザー衛星の周辺で一体何事が起こるのかを研究しました。

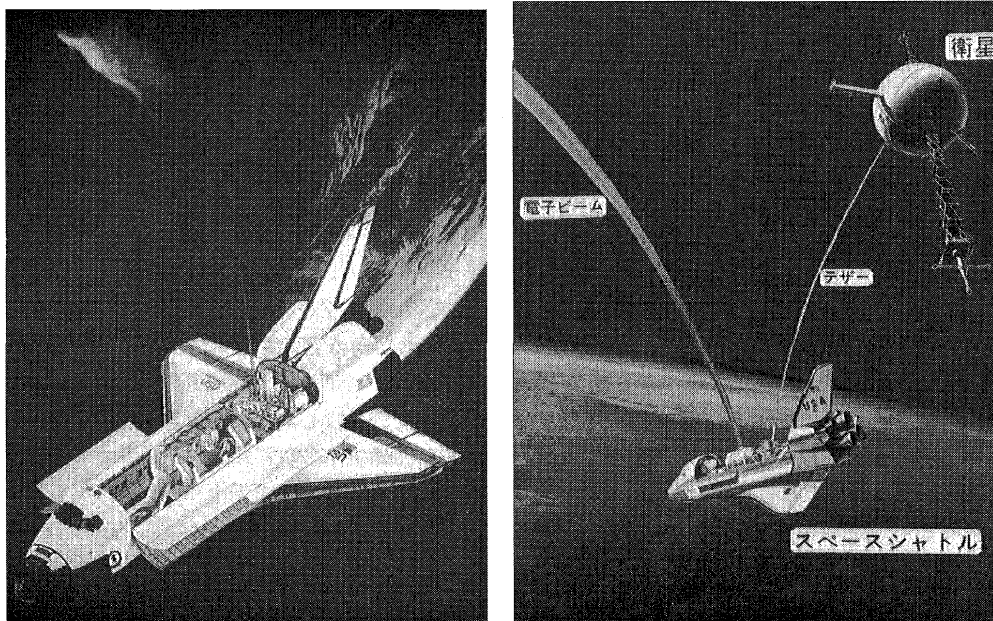


図6 スペース・シャトルによる電子ビーム実験(左図)とレーザー衛星実験の概念図(右図)

もう一つの宇宙実験は、宇宙に実際実験装置を打ち上げる代わりに、宇宙で起こっている現象を計算機の中に再現させ、計算機のメモリー上で、各種の模擬実験を行うものです。そのために、科学が確立した基礎方程式だけを組み合わせ、理論モデルを作り、数10万から数100万の連立方程式をスーパーコンピュータに解かせるもので「コンピュータ実験」とか「コンピュータ・シミュレーション」と呼ばれています。筆者は「コンピュータ実験」という呼ばれ方が好きです。「シミュレーション」という言葉は自然現象を模倣さえすれば良いという響きがあってあまり好きになれません。「コンピュータ実験」がちょうど「理論」と「宇宙実験」との間を埋める数値実験としての役割が大きいという観点からもう呼ぶ方が適切と思っています。事実、最近、コンピュータ実験の手法を使って、宇宙観測では得られない詳しい情報を拾い出し、人間の頭脳だけではどうしようもないむづかしい問題を解き、学問の体系化をは図ろうとする努力がなされています。図7はコンピュータ実験の進め方を図にしたものです。

宇宙科学の分野では特にこの手法は重宝です。巨額の研究費と長年の準備期間を必要とする衛星観測のデータを生かすためにも、コンピュータ実験による理論解析は大変有効で、今後ますます必要とされるでしょう。私たちの研究所はこの分野でも世界をリードしてきました。講演ではコンピュータ実験が生み出したおもしろいプラズマの世界の力学をアニメーションなどを混じえてお話しします。

物理現象を理解する方法には「理論的手法」と「実験的手法」があります。ちょっとくどくどしますが、理論研究の多くは、未解決の（もしくは新発見した）問題を既に知られている普遍的な基礎方程式系（またはその変形）の組み合わせで記述する努力をして、その解を求め、物理的解釈を与えようという仕事です。

計算機実験の流れ

モデリング

- ・ どの領域、現象を対象とするか。
- ・ 微小領域ならプラズマを粒子、グローバルな領域ならプラズマを流体。
- ・ 現象は1次元？それとも2次元、3次元？

数値実験

- ・ 宇宙プラズマ中の基礎方程式
 - ・ Maxwell式（電磁界）
 - ・ 運動方程式（プラズマ）
- ・ 電磁界とプラズマの挙動は互いに影響を及ぼすため上の2式は同時に解き進める。

グラフィック処理・解析

- ・ 数値実験で得られた数値データをグラフィック化、アニメーション化により解析。

図7 コンピュータ実験の進め方

8. 宇宙プラズマ現象のコンピュータ実験の例

スペース・プラズマ物理学においては、理論的研究の多くはこの傾向が強く見られます。実験事実の説明に行き詰り、既存の物理法則にない新法則が発見・提案される事は稀です。スペース・プラズマ現象は多くの場合、同時に進行したり、競合しながら進行する物理プロセスが多いため、選ばれる仮説または抽象化プロセスに自由度が多すぎて、複数の理論的解釈ができてしまいます。そのため、自然界の物理像は混沌としていることが多いのです。一方、宇宙プラズマに関しては、実験的研究も一部の能動実験の場合を除き、初期値や境界値などをコントロールした状態で行なえる実験は少なく、ほとんどの場合、自然まかせの受動的な観測研究が主流です。宇宙空間という自然界への人間の挑戦レベルはまだまだ低いと言わざるを得ません。したがって、これまで物理学的研究の一般的指針とされてきた「枝葉をばっさり落とし、幹とか根とかいう本質（基本法則）のみを抽出する」という研究手法は大変困難となっています。そこで、プラズマ物理学においては「より細かく分解することを止め、より現実に近い多くの相互作用を含んだ系をあるがまま追求する」という発想が考えられます。コンピュータ実験（コンピュータ・シミュレーション）はこの発想に基づいており、その役割が近年次第に重要視されてきています。宇宙プラズマ研究においてはその重要性はますます高くなってきています。理論や実験（観測）に不確定性が多く、推論の余地が大きすぎるため、コンピュータ実験による定量的研究が多くの場合、理論や実験（観測）の不足分を補ってくれるからです。事実、「理論」と「実験」と「コンピュータ実験」とは三位一体の関係をなしていて、この三つが有機的に助け合って初めてうまく物事が理解出来るという考えが定着しつつあります。

当研究所では、もう20年以上も前から、コンピュータ実験の重要性に気づき、まだ計算機的能力がよちよち歩きの時代からコンピュータ実験用のソフトウェア開発に取り組んで参りました。なかでも、KEMPO (Kyoto university ElectroMagnetic Particle cOde) と名付けたソフトウェア（コード）は、かなり汎用性があり、一部はすでに世界中の研究者に公開して使っていただいています。このコードは、電磁界を記述するマクスウェル方程式とプラズマ粒子の運動を記述する運動方程式を連立させて、プラズマと電磁界との相互作用を時間的に追跡できるようにしたものです。

プラズマの粒子は電磁界から力を受けて、動こうとします。しかし、電気を帯びたプラズマの粒子が動

くと、電流を流すことになります。電流が流れると電磁界が変わります。つまり、どの粒子が動いても、電磁界が変化し、電磁界が変化するとどの粒子の動き方もそれにつれて変わるわけです。「風が吹くと桶屋が儲かる」という人間社会にも似て、誰かがなにかをすると誰かに（たぶん厳密にはすべての人に）影響がでるように、お互いに電磁界という糸で結ばれたプラズマの粒子群の複雑な動きとその結果として現われる電磁界（電磁波）を解く必要があるのです。この複雑に絡み合ったシステムの中の粒子 1 個々の運動をすべて解くわけですから、結局、数百万連立方程式を解くことになります。このような単純ですが、人の頭脳では解けない問題でも、コンピュータはこなしてくれます。

紙面の都合上、本テキストでは詳細は書けませんが、以下のいくつかのコンピュータ実験のトピックスを講演ではお話しします。

(1) 電子ビームが作り出すプラズマのパルス

電子ビームは地球の極域磁気圏に降り込み、波動を励起させたりオーロラを光らせたり、磁気圏の尾部を走り、奇妙なパルスを作り出しています。ビームが走ると図 8 に示されるように、ちょうどコーヒーの中にクリームを落とした時のように速度空間で渦巻きを示します。図 8 はそのような渦巻きの一例を示します。その結果できる静電ポテンシャルはパルス状になり、GEOTAIL 衛星で観測されたパルスの秘密を解き明かしました。

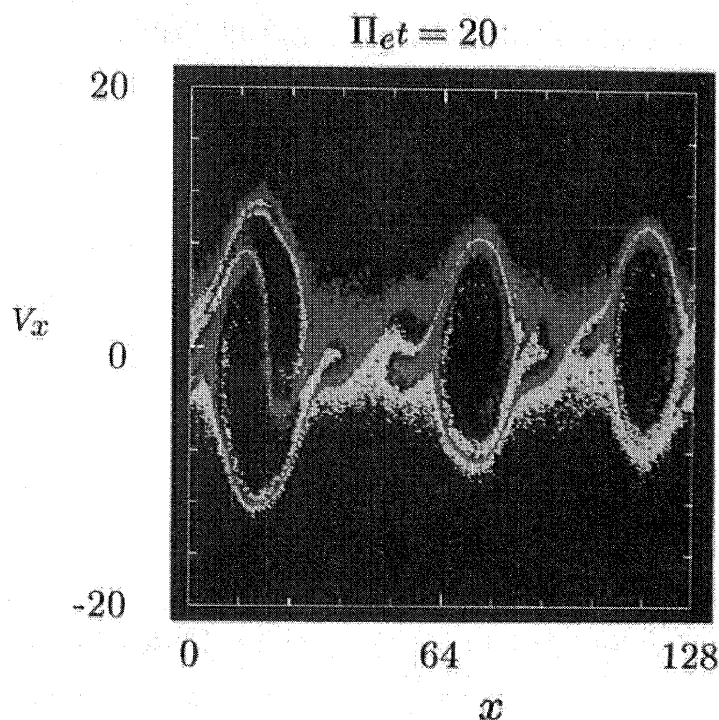


図 8 電子ビームの非線形挙動のコンピュータ実験の結果

(2) 彗星から噴流する水系イオンの振る舞い

ハレー彗星から吹き出る水プラズマの作り出す電磁波の研究

(3) 地球の尻尾のプラズモイド

地球の尻尾で発生する巨大なプラズマの雲の研究

(4) テザー衛星による宇宙プラズマの乱れ

テザー衛星の周辺で起こる電磁環境の研究

(5) 地球大気への再突入する宇宙飛行体の電磁環境

アポロやシャトルが地球に帰還するときのブラックアウトの研究

(6) 太陽へ突入する人工惑星のシミュレーション

- 高速プラズマの流れの中の衛星が作り出すプラズマの乱れの研究
(7) マイクロ波電力ビームと宇宙プラズマの非線形相互作用
MINIX ロケット実験で発見された非線形プラズマ波動励起の研究
(8) プラズマ・ダイオードのカオス
プラズマ世界の「バタフライ現象」の研究

9. 終わりに

宇宙空間とくに太陽系空間は、単に知的好奇心の対象にとどまらず、我々の子孫が 21 世紀には活尾する領域です。うまくゆけば、コスモ・ホモサピエンス（新宇宙人）と呼ばれる私たちの子孫の生活空間でもあります。こう考えた場合、プラズマ環境中の種々の相互作用を十分に研究し、理解しておくことが宇宙生存圏の開発にとって、現在の宇宙科学の重要な任務の一つであることに気付くでしょう。本講演では、電波の研究を通して、私たちが宇宙に興味をもちながら、宇宙を科学し、宇宙開拓の夢をめざして日夜研究に取り組んでいる一端をご紹介いたしました。ご紹介しました。生存圏研究所の宇宙電波科学分野、生存圏電波応用分野、生存科学計算機実験分野の研究は、筆者の周辺の研究室教官、院生、学生、秘書、そして研究所のスタッフの力を合わせた成果であり、国の内外の研究者との共同研究の成果も含んでいます。紙面を借りてその方々にお礼を申し上げたいと思います。

参考文献

一般的な参考文献としては

- 1) 大林辰蔵：宇宙空間物理学，常華書房，1971.
- 2) 前田憲一，木村磐根：現代電磁波動論，オーム社，1984.
- 3) Matsumoto, H., ed. : Modern Radio Science, Oxford University Press, 1993.
- 4) 松本紘：宇宙開拓とコンピュータ，共立出版，1996.

宇宙太陽発電所やマイクロ波送電関係の参考文献としては

- 5) Matsumoto, H.: Numerical estimation of SPS microwave impact on ionospheric environment, Acta Astronautica, 8, 493-497, 1982.
- 6) Matsumoto, H. and I. Kimura : Nonlinear excitation of electron cyclotron waves by a monochromatic strong microwave, Space Power, 6, 187-191. 1986.
- 7) Kaya, N., H. Matsumoto, S. Miyatake, I. Kimura, M. Nagatomo and T. Obayashi : Nonlinear Interaction of strong microwave beam with the ionosphere - MINIX rocket experiment -, Space Power, 6, 181-186. 1986.
- 8) Matsumoto, H., Microwave power transmission from space and related nonlinear plasma effects, space and Radio Science Symposium, Edited by P. Van Daele & P. Delogne, 155-190, 1995.
- 9) 松本 紘：宇宙太陽発電システムにおけるマイクロ波エネルギー伝送，エネルギー・資源，Vol. 9, No.3, 270-274, 1988.
- 10) 松本紘：電磁波形態によるエネルギーの長距離輸送，エネルギー・資源，Vol.13, No.6, 530-537, 1992.
- 11) Matsumoto, H. : Microwave Power Transmission from Space and Related Nonlinear Plasma Effects, Space and Radio Science -- 75th Anniversary of USRI, 155-190, 1995.

コンピュータ実験や宇宙実験関係の参考文献としては

- 12) Matsumoto, H. and Y. Omura : Particle simulation of electro-magnetic waves and its application to space

plasmas, COMPUTER SIMULATION OF SPACE PLASMAS edited by H. Matsumoto and T. Sato, Terra Sci. Pub. Co., 43-102, 1984.

- 13) 岡田雅樹, 大村善治, 松本紘: 希薄高速プラズマ中を航行する衛星による電磁氣的擾乱に関する計算模実験, 電子情報通信学会論文誌・B-II, Vol.J75-BII, 179-187, 1992.
- 14) 松本紘: 波動と粒子の非線形相互作用・核融合研究, 66 巻 2 号, 119-132, 1991.
- 15) Matsumoto, H. and Y. Omura, ed. :Computer Space plasma Physics : Simulation Techniques and Software, Terra Scientific Publishing Co., 1993.
- 16) Usui, H., H. Matsumoto, and Y. Omura : Plasma response to high potential satellite in electrodynamic tether system, J. Geophys. Res., 98, 1531-1544, 1993.
- 17) Matsumoto, H., H. Kojima, T. Miyatake, Y. Omura, M. Okada, I. Nagano, and M. Tsutsui ; Electrostatic Solitary Waves (ESW) in the Magnetotail : BEN Wave forms observed by GEOTAIL, Geophys. Res. Lett., 21, 2915-2918, 1994.
- 18) 松本 紘、臼井 英之、竹中 聡 : 再突入宇宙機ブラックアウト現象と磁場印加によるその回避法の計算機実験、電子情報通信学会論文誌、80-B-II, 257-264, 1997.
- 19) Matsumoto, H., H. Kojima, Y. Omura, and I. Nagano ; Plasma waves in Geospace: GEOTAIL Observation, Geophysical Monograph by the American Geophysical Union, 105, 259-319, 1998