

# 宇宙開発・宇宙科学と私たちの暮らし\*

## —— 元氣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、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っ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受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、トイレトペーパー騒ぎなど

が起り、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り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2~3億人程度にどまっていた。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。

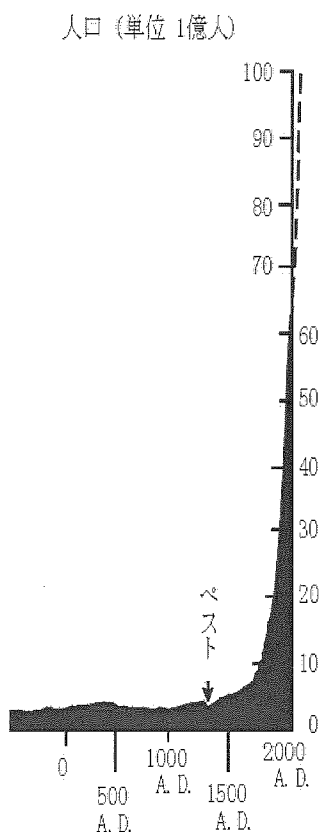


図1 世界の人口推移と人口爆発

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って、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、富と資源を増えつづ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のでしょうか。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。

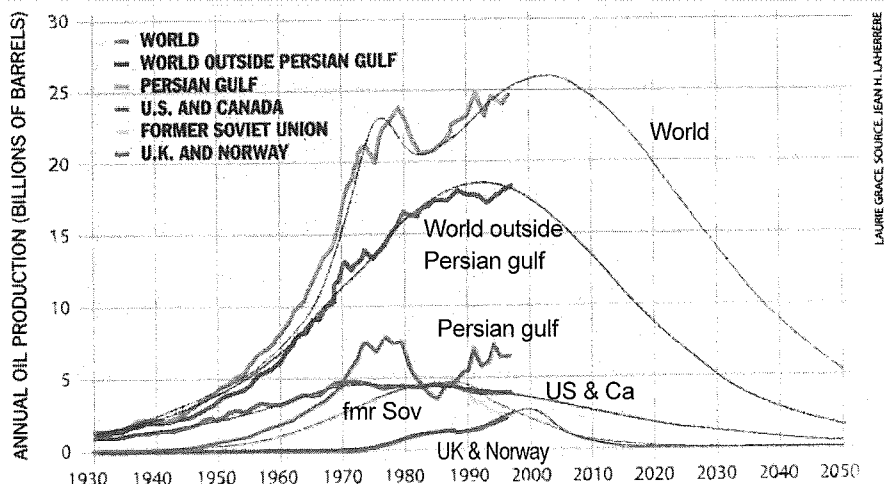


図2 Colin J. Campbell と Jean Laherrere による最新データに基づく石油埋蔵量の Hubbert 曲線 (Scientific American '98/3 月号)

### 3.3 免罪符となっ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きています。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となります。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、「今までなんとかな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となります。また、水力発電も太陽が引き起こす大気と陸地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射しています。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となりますね。

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となります。

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。

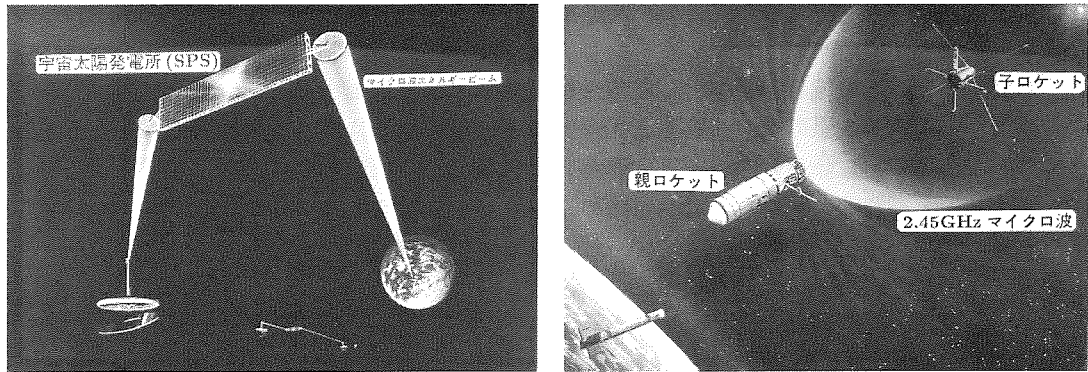


図3 SPS の概念図(左図)と MINIX ロケット実験(右図)

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

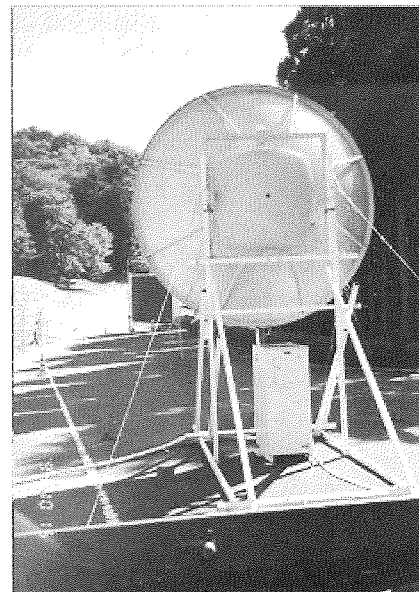


図4 MILAX 飛行機実験(左図)と地上2 定点間マイクロ波送電実験(右図)

(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、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バ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ね。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よね。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ことが分かるでしょう。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ね。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う。私たちはその鉛筆の線の太さくらいの気層の、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。

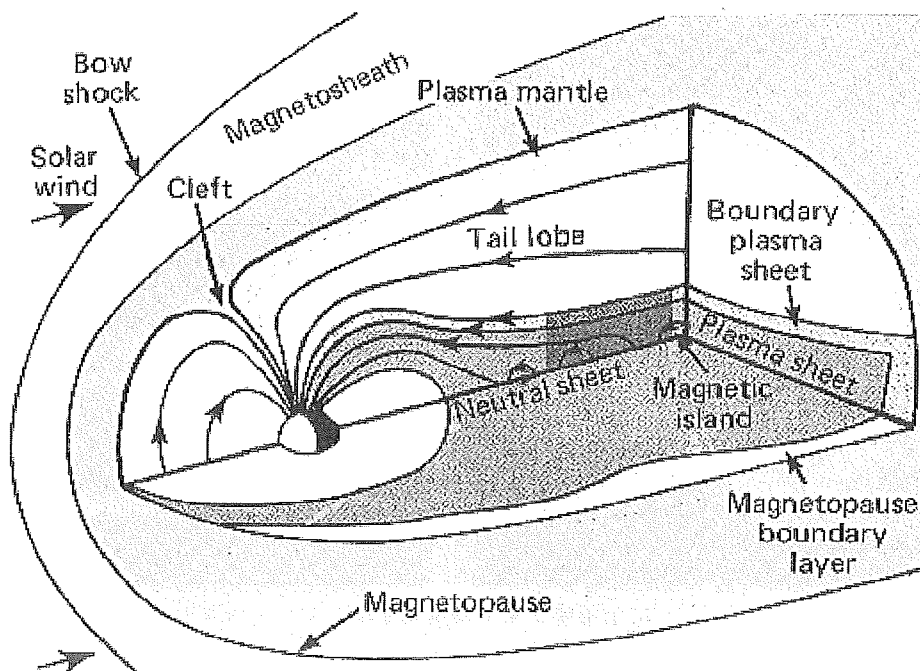


図5 地球周辺の電離圏・磁気圏の模式図

## 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步踏みだし、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。私たちが、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。

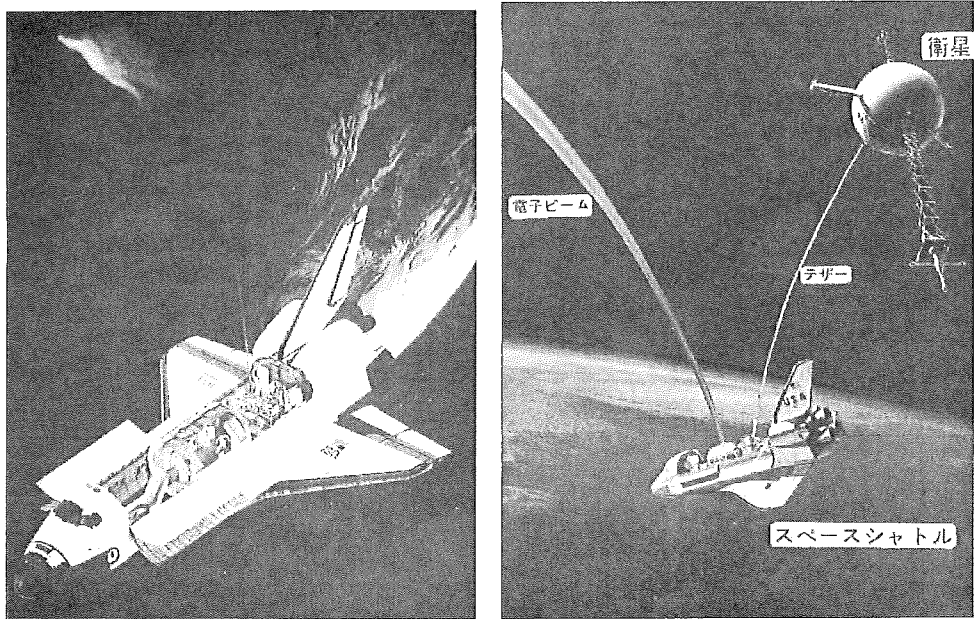


図6 スペース・シャトルによる電子ビーム実験(左図)とレーザー衛星実験の概念図(右図)

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こ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つかしい問題を解き、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ぜてお話しします。

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（基本法別）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、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、まだコンピュータの能力がよちよち歩き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、電流を流すこととなります。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）影響ができるように、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となります。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。

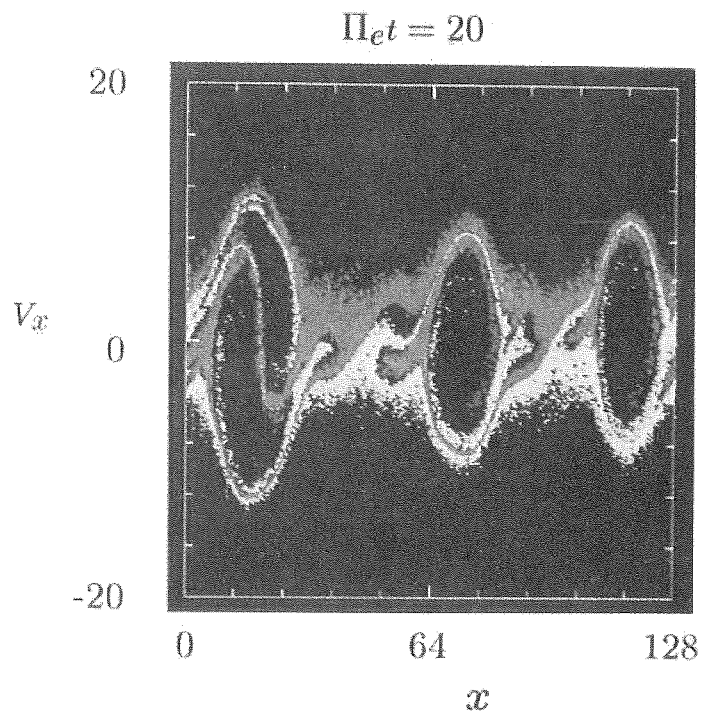


図 8 電子ビームの非線形挙動のコンピュータ実験の結果

(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 卷 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

# 日本と中国の木の文化を較べる\*

伊東隆夫\*\*

## 1. はじめに

「文化」とは何か。広辞苑を紐解くと、3つの意味が記されている。①世の中が進歩し文明になること。ひらけること。文明開化。②文徳で民を教え導くこと。③人間が学習によって社会から習得した生活の仕方の総称。衣食住を初め技術・学問・芸術・道徳・宗教など物心両面にわたる生活形成の様式と内容とを含む。

ここでいう「文化」というまでもなく、③の意味であり、これを「木の文化」にあてはめると、“人間が学習によって、野外に生育する樹木を生活の中に如何に取り込み、利用・習得してきたかという生活の仕方の総称であり、衣食住のうち、とりわけ住にかかわり、技術・芸術・宗教など樹木が物心両面にわたり及ぼして形成された生活の様式と内容のこと”である。この木の文化を深く探求する学問、これを筆者は“木の文化を科学する”と呼んでいる。

木の文化の発達をみていくときに、その源となる森林や樹木の存在なくしては論じられない。そこで本稿では、まず始めにわが国と中国における植生の現状について触れてみたい。次に、木の文化を比較する代表的な事例として、遺跡出土木材、木彫像、古建築について、わが国と中国との調査例を紹介したい。最後に、国宝を超える国宝とも言える正倉院宝物の中で、木製の宝物を取り上げ、シルクロードを経由して中国の影響が及んでいる具体例を紹介したい。

## 2. 日本と中国の植生

わが国は世界の中でも植物が豊富な国だと若い頃からなんとなく思っていた。木の文化を科学し始めて、様々な木材を扱っているうちに、もう少し具体的に植生について知りたいと思うようになった。植生に関する書物<sup>1)</sup>を参考にすると、わが国には種子島・屋久島以北で、シダ植物と種子植物を含めて1110属、3857種分布し、さらに琉球列島に105種、小笠原諸島に144種が分布するので、大まかには全体で4500種が生育すると言われる。わが国と緯度的にほぼ同じような世界の地域の植生と較べてみると、北米東北部では658属、2835種が分布し、ニュージーランドでは400属、1871種が分布するという。わが国が如何に豊富な種類の植物に恵まれているかがわかる。ところが、中国となるとわが国とは比べものにならないほど多くの植物に恵まれている。一度でも中国の西域を訪れた方は大なり小なり感じると思うが、飛行機で見下ろす大地は行けど行けどもほとんど裸同然である。どこに植物が繁茂しているのかと疑いたくなるほどである。しかしながら、中国はわが国と違い途方もなく広大な国土を有する国である。中央部や西部は植物があまり多くないが、北部や南方地域に豊富に植物が分布する地形である。黒龍江省、吉林省、遼寧省を含む北方地域に寒帯から温帯に生育する樹木が豊富に分布し、雲南省、広西省、江西省、福建省、それに海南島を含む南方地域には暖帯から亜熱帯に成育する樹木が豊富に分布する。全126巻発行された「中国植物志」には、種子植物だけで、301科、3408属、31142種が記載されている。

上記のわが国の植生で示した数字には、シダ植物や草本種も含まれている。木本種のみを対象とすると、日本の野生植物<sup>2)</sup>では1138種が取り扱われている。一方、外国産樹種も一部含む原色樹木大図鑑<sup>3)</sup>には

\* 2005年9月22日作成

\*\* 京都大学生存圏研究所バイオマス形態情報分野 E-mail:titoh@rish.kyoto-u.ac.jp



約 1500 種が扱われている。そもそも、樹木のうち、広葉樹は被子植物、双子葉類の中の木本種のことを言うのであるが、木本や草本はきわめて便宜的な分類であり、木本と草本の境界に近い種類は分類学者によって草本に扱われたり、木本に扱われたりする。また、先ほどの日本国内の種類総数には琉球列島や小笠原諸島の樹木を網羅していない。このような事情を考慮すると、わが国の樹木の総数は約 1500 種くらいであろう。これに対して、中国の樹木の総数はどうであろうか。現在、手に入る文献の中で樹木のみを網羅した「中国樹木志」<sup>47)</sup> では約 8000 種が記載されている。そのうち、高木にあたる数は約 2000 種、残りの 6000 種は低木である。

植物地理学では種や属が共通して生育している地域をまとめて区系と呼んでいる。日本と中国は共に日華植物区系に属し、わが国と中国には共通して生育する種類が豊富に存在する。「日本の野生植物 木本 I、II」に掲載されている 1138 種のうち、183 種が台湾に、449 種が中国大陸に生育する種類であり、104 種が台湾にも中国大陸にも生育する。したがって、台湾と中国大陸合わせて 528 種が日本と中国のどちらの国にも生える共通の種類ということになる。すなわち、日本の野生植物に記載された樹木総数の約半数の種が中国にも生育しているのである。実際には、低木類でまだ調べられていない種類がある可能性が高いので、共通の種類数はもっと増えると考えられる。ともあれ、この数字をみてもわが国と中国とは似通った植生を有することが理解できるであろう。

### 3. 遺跡出土木材

遺跡から出土する製品には金属器、土器、木器に分けられる。木器は有機質であるが故に腐りやすいので、コンテナに水を張ってさらに防腐剤を加えて木製品を保存するなど、他の製品と比べ、取り扱いが困難であった。しかしながら、保存処理技術の向上に伴って、一旦保存処理すれば、水に漬ける必要は無くスペースもとらず、かつ標本の展示も可能になったので、現在わが国では他の製品と同等に取り上げられ、詳しい調査がなされるようになった。一方中国においても遺跡出土木質遺物の保存処理が少しずつではあるが、進んできている。

#### 3.1 わが国の遺跡出土木材の研究

全国の都道府県に遺跡発掘調査をおこなう埋蔵文化財調査専門のセンターなり事務所が設けられており、毎年膨大な量の発掘調査報告書が出版されている。その中で木質遺物の用材についての詳しい分析データを対象に、これらのデータをコンピュータに入力して整理したいいわゆる遺跡出土木材のデータベースを作成してきた。現在までに整理できたデータは以下の通りである。

レコード数：57000

木質遺物総数：223000 点

このデータによれば加工用の道具が未発達な縄文時代においても様々な木製品が製作されており、さらに加工用具の発達が進む弥生時代以降においては一層多くの木製品が発達してきたことがわかる。遺跡からは完形品が出土することはきわめてめずらしいこともあって、何のために作られた木製品かわからないものも多々あるが、わが国の先人たちは古来より用途にかなった樹種を適切に選択してきていることや、樹種の意外な用途が明らかになったりすることがわかっている。

#### 3.2 中国における遺跡出土木材の研究

出張で中国を訪問した折に時間があれば遺跡の見学に向いて資料を集めてきた。したがって、情報には限りがあるという前提で、見聞きしたこと、感じたことを記す。

中国における遺跡の発掘調査で、敦煌莫高窟、河姆渡（ホムドウ）遺跡、楼蘭遺跡、西安市にある秦の始皇帝陵の兵馬傭、湖南省にある馬王堆漢墓、印山越王陵などこれまで数々のすばらしい調査例が知られている。当然のことながら木器も多数出土しているが、取り上げられて保存されている例はごく限られている。実際にはもとにあった場所に戻されてしまうケースが多いようである。その理由の一つは中国に

において保存処理技術の普及がまだ十分でないことがあげられる。わが国では保存処理を専門とする企業が全国に多くあり、かつ、都道府県にある埋蔵文化財センターにおいても独自で保存処理をおこなっているところが結構みられる。これに対して、中国では、北京、上海、南京といった、国立の考古研究所や大きい博物館を抱えるところ、その他一部の研究施設にしか、十分機能する保存処理施設がないようである。今後、中国においても、国家の補助を受けて樹種の同定が進み、保存処理施設が充実していくことを期待する。

以下に、筆者が垣間見た遺跡の例を出土木材と関連させて簡単に紹介する。

### 3.2.1 河姆渡 (Hemudu, ホムドウ) 遺跡

河姆渡 (ホムドウ) 遺跡は図1に見られるように1メートル余りの無数の木杭が林立していた。これはレプリカであり、実際の杭はすべて取り上げられ、浙江省博物院に保管されていると聞く。これは復元すれば高床式の住居となるが、そういう住居の土台を支える柱であったようである。



図1 河姆渡遺跡 高床式住居に用いられたと考えられる土台柱

河姆渡遺跡を訪れたときに目にした現地説明文に、この遺跡の性格が簡潔に記されていたので紹介する。「ホムドウ遺跡は新石器時代の村の廃墟で1973年夏に発見された。遺跡の総面積は約40,000平方メートルある。1973年と1977年の冬に2,800平方メートルの範囲の2度にわたる発掘で、堆積層の厚さが4メートルで、4つの文化に渡る層を包含し、農具や生活用具や原始的な工芸品などを含む6700以上もの遺物が出土した。同時に、人骨、大量の栽培イネ、広範囲にわたる木造住居址、豚、犬、バッファロー、猛禽類、果実などの遺物も目の目をみた。第3および第4層は未知の文化に属する文化的堆積物に富んでおり、ホムドウ文化と名付けられた。4つの文化の堆積層の絶対年代は放射性炭素の測定により7,000年前であった。これらはすべて、中国における農業、建築、繊維、工芸、文明の起源の研究にとって大変価値のある材料を提供する。したがって、中国における最も重要な考古学的発見の一つと認められる。ホムドウ遺跡は中国文化の揺籃期にあたる。」

河姆渡 (ホムドウ) 遺跡は例えて言えば、わが国の青森県にある特別史跡の三内丸山遺跡にあたるかと考えてもいいであろう。この遺跡の時代は河姆渡 (ホムドウ) 遺跡よりも少し新しく、今から約5500年前～4000年前の縄文時代の集落跡である。

### 3.2.2 西漢“黄腸題凑”木椁墓

わが国の弥生時代にあたる漢代の墓で、この時代独特の製作法で造られている。これまで9基が発掘されている。その一つの西漢広陵王 (Xi Han Gang Ling Wang) の神居山漢墓 (Shen Ju Shan) を見る機会があった。全体の形状は直方体で長さ 16.35 m、幅 14.23 mm、高さ 4.5 m で中央に棺が置かれている。木椁の用材はすべて楠木(*Phoebe nanmu*)で、外周部は一辺が 40 cm ほどの角材が積まれたきわめて頑丈な造りである。

### 3.2.3 ニヤ遺跡

尼雅 (ニヤ) 遺跡は、中国新疆ウイグル自治区のタリム盆地に広がるタクラマカン砂漠の中にある遺跡で、シルクロードの西域南道の沿線上に位置する。同遺跡は、紀元前 1 世紀～紀元 4 世紀に栄えたとされる幻の古代都市で、当時、「精絶王国」または現地語で「チャドータ」とも呼ばれた。遺跡の規模は東西 7km、南北 25km に広がり、仏塔を中心に 70 の住居址、多くの墓地や家畜小屋、窯跡、果樹園、橋、畑、さらに



図2 ニヤ遺跡住居址 多くの胡楊の角柱が林立する

は、枯渇した河床や大面積の枯死樹林帯がほぼそのまま遺存している。時代としては楼蘭遺跡にほぼ匹敵するが遺物の規模では楼蘭を凌ぐ。現地を駱駝に揺られながら調査した経験があるが、2000 年ほど前の木製の柱が今でも多数林立する光景 (図 2) は忘れがたい。

自然木、庭木、住居、橋などの木材に使用されているのはほとんどがハコヤナギ属であった<sup>8)</sup>。ハコヤナギ属の中のどの種類かについては、現地での詳細な調査も参考にして、現在でも現地で生育する胡楊 (コヨウ) であることがわかった。その他にはヤナギ属、タマリクス属のほかスナナツメなど若干数の樹種が用いられていた。この他に、椀、紡錘車、案、臼、木鍵、緯打具、木棺、火鑽臼、櫛、弓、矢、各種祭祀具、鋤、鋏、その他農具などの多様な木製品がみられ、日常生活用具として夥しい数の木製品が出土している。中には黄河流域 (中原) から運ばれたと思われる漆器製品も出土している。

なお、西域は遺跡の宝庫であり、多くの木製品が出土しているが、これらの樹種が調べられたのはほんの一部であるので、今後、西域における遺跡出土木製品の調査がなされることを期待する。

### 3.2.4 鄭和宝船

2003 年に南京市内のかつて造船所であった港の水底から木造船の巨大な舵 (図 3) を始め、多くの遺物が発掘された。その船は、中国の明代において海のシルクロードを開拓した航海家として知られる鄭和

(Zheng He)が造船したものである。船の大きさは大きいもので長さ 125 m, 幅 50 m といわれる。鄭和は 1405 年より 1433 年に至るまで 7 回にわたって、毎回船 200 隻、2 万人を率いて、東南アジア、インドさらにはアフリカまで航海し、約 30 ヶ国を訪問した。今年がちょうど鄭和の航海の 600 周年にあたるので中国で盛大に記念の行事が行われている。南京博物館（南京博物院ではない）にはこれまで発掘された多くの遺物が展示されている。現在中国の研究者がこの舟の用材を調べているが、広葉杉が多く使われていると聞く。

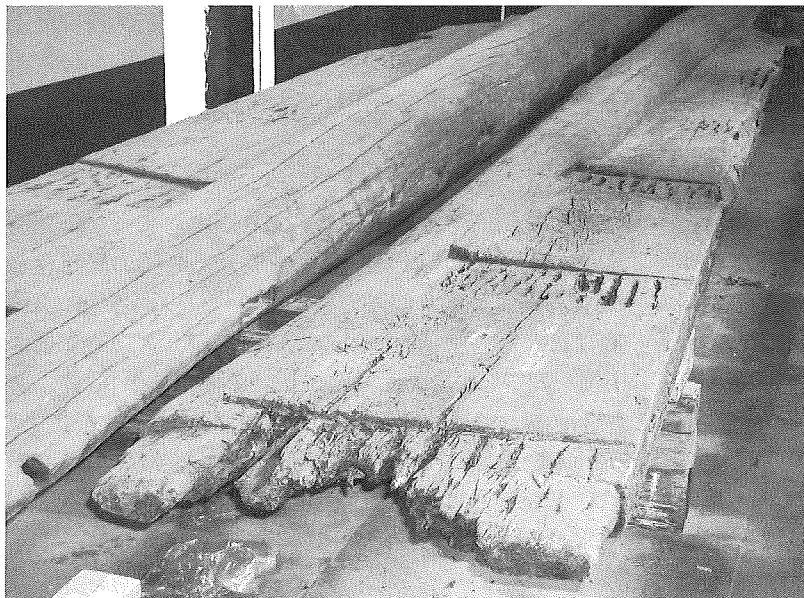


図3 最近発掘された鄭和宝船の舵（南京博物館にて撮影）

（参考のために）

#### 元寇船

13世紀にモンゴルのフビライ・ハーンが九州に進攻したが、神風によって船はほとんど沈没したことは日本人ならほとんどの人が知っている歴史上の事実である。いわゆる「元寇船」である。伊万里湾に浮かぶ鷹島に進攻・集結したときに台風で沈没したのである。専門家によると、1274年の最初の攻撃のときに、4万人の兵士が900隻の船に乗って鷹島住民を滅ぼした。1281年の2回目の攻撃では、14万人が4400隻の船で侵攻したが、再び台風に会い、3000隻の船と10万人の兵士が海の中に沈んだとされる。船の引き上げは1980年に始まった。最近、貝の付着したモンゴル製の壺で作った爆弾、剣、大きな錨、中国語が書かれた容器などが発見された。多くの木片が引き上げられているが、どの木片がどの船に属するのかわからない。船は40メートルあり、中国か韓国で造られたとされる<sup>9)</sup>。筆者らは樹種を調べることにより、船の造られた場所が特定できる可能性があると考え、数回にわたり、鷹島に出向き、木片試料をサンプリングし、調査を進めている。最終結果を得るには時間がかかるが、少なくともわが国に生育しない樹種が含まれている。元寇船は鄭和宝船よりも約150年前にあたり、時代がきわめて近いので、両者の調査の結果が互いに大変有効であると考えられ、成果が期待される。

#### 4. 木彫像

わが国に仏教が伝来して以来、信仰の対象となる木彫像の制作が増加したと考えられる。そもそも、仏教の発祥の地であるインドや経由国の中国では石や金属で作られた仏像が多いのであるが、わが国では石や金属のかわりに木材が多用されてきた。わが国の仏像彫刻のうち8割から9割が木彫像であるとされる。

したがって、わが国では、仏像彫刻と言えば木材でできているといっても過言ではない。そんなわけで、木彫像の存在はわが国が木の文化を育ててきたことの一つの証といえる。

#### 4.1 わが国の木彫像の研究例

わが国の木彫像用材の研究は1951年の小原二郎先生の報告<sup>10)</sup>にさかのぼる。同先生の1964年の報告<sup>11)</sup>に基づく615体(試料数651)の木彫像の樹種が同定されている。その結果から、わが国最古の木彫像の百済観音像をはじめ飛鳥時代の木彫像はクスノキでできているが、奈良、平安と時代が進むとヒノキに取って代わるとい調査結果が公表されている。8世紀の木彫像に関する最近の研究によるとヒノキ造りと言われていた木彫像がカヤ材であったという結果が得られている<sup>12)</sup>。同時代における木彫像の用材の多くがカヤであったことから、当時はカヤが木彫像の重要な用材であったようである。

#### 4.2 中国の木彫像の研究例

中国由来の木彫像の用材についての研究例はきわめて限りがあり、まとまった研究例は皆無であった。そんな折に、当研究室において木彫像の用材について強い関心を寄せる外国の研究者との共同研究で、最近2年間にわたって中国由来の木彫像の研究に取り組んできた。ヨーロッパ各地の美術館等に保管されている中国由来の木彫像の割れ目や裂け目から、マッチ軸木の先端ほどの、きわめて小さい木片を提供していただき、当研究室に持ち帰って樹種を同定してきた。同定総数は仏像彫刻が34体、道教彫刻が5体である。多くがポプラ属、キリ属、シナノキ属、コウヨウザン属の樹種であった。これらはいずれも、強度的には柔らかい種類に属する。わが国の木彫像にはほとんど使用されない性質の樹種である。わが国の木彫像の用材であるヒノキ、カヤ、クスノキなどと対比すると、用材に大きい違いがみとれる。家具や調度品でキリ材を良しとするわが国と唐木を良しとする中国に用材観の違いがみられるように、木彫像の用材観においても同様の違いがあるのかも知れない。しかし、調査した木彫像のサンプル数が少ないので、単に、限られた地域の用材傾向に過ぎないのかも知れない。今後、さらに調査を広げてこの問題解決のために研究を進めていきたいと考えている。

### 5. 古建築

#### 5.1 日本建築

日本建築は、国土の70%が山に囲まれ、湿気が多い気候風土により古代から近世に至るまで一貫して木造建築である。その構造は柱を立て桁や梁でつなぐ構法で軸部を組み、桁に垂木を打って軒を架け、屋根を造っている。寺院建築では柱の上に組物を置いてから桁でつなぐ。屋根は建物の種類に応じて、瓦、板、檜皮、茅などを置く。鎌倉時代になると、中国から大仏様と禅宗様の二様式が持ち込まれ、柱に貫をさし通して軸部を固める構法が伝えられ、その後の構造の模範となる。軸部では、隅へいくに従って柱を少し長くして、軒を反らせるなどの意匠効果をねらったり、柱を上方でわずかに内側へ倒す、いわゆる、内転びの技法により、柱頭部が外へ開くのを防いだ<sup>13)</sup>。柱上にあつて斗と肘木で構成される組物は桁を支持する支点を分散させるほかに、桁を外方へ持ち出して軒の出を深くする役割をもつ。組物は日本古来の神社建築にはなく、飛鳥時代に中国・朝鮮半島を経由してもたらされた。

日本建築の用材にはヒノキが第一に浮かぶが、実際にはそれ以外の用材も結構使われていた。飛鳥時代の山田寺ではクスノキの柱が発見され、8世紀の薬師寺東塔、当麻寺西塔にはケヤキが用いられた<sup>14)</sup>。また、平城宮の建物にはヒノキ以外にコウヤマキが多用された。それでも主流はヒノキであることに間違いはない。鎌倉時代に入ると資源の枯渇のため、マツやケヤキが使われ始めた。現在、奈良の唐招提寺が大規模の修復工事をおこなっている。全面的に解体され、劣化・腐朽している部材を取り替えて、再び元の形に戻される。この機会に、唐招提寺および奈良県教育委員会の協力を得て、多くの部材の樹種を同定した。その結果、当初材はほとんどがヒノキであったが、江戸時代以降の修復工事ではマツ、ツガ、ケヤキの割合が増加して行くことが判明した。

## 5.2 中国建築

中国建築の構造様式は石や磚（セン）のブロックを積み上げる基壇・壁構造の系統と木を組み立てる高床・柱梁構造の系統とがあり、前者は北方の黄河流域（中原）に発達し、後者は南方の長江流域およびそれ以南に発達した。宋(960～1127)金(1115～1234)以前の木造建造物は山西省に多数残っているが、それは全中国の同時代の木造建造物の7割以上を占めるといわれる。そして、木造建築独自の大系は漢代に発展し、唐代に確立したとされる。飛鳥時代のわが国の仏教建築には、同時代の隋や唐よりも古い時代のさまざまな様式・技法が混在しているとされる。晩唐の現存建築に南禅寺大殿、広仁王廟正殿、仏光寺大殿がある。

五台山（山西省）にある南禅寺大殿は中国の現存最古の木造建築で、創建は782年である。奈良の唐招提寺金堂は晩唐の影響を受けているが、仏光寺大殿より簡略化されているとされる。唐代に確立された建築様式は宋、遼、金、元の各代を通じて発達し、意匠上の変容や整備が進んだとされる<sup>15)</sup>。

中国建築の用材については散点的にしかわかっておらず、今後、調査が進むことを期待する。

### 仏宮寺釈迦塔（応県木塔）

山西省応県の西北にある高さ67メートルの現存する中国最古の木造仏塔であり、造りが広壮・細密で中国建築史上至宝の塔の一つである。正式には仏宮寺釈迦塔といい、人々からは応県木塔と呼ばれ親しまれている。八角形を呈し、外観は六層のように見えるが初層に裳階（モコシ）がある五重塔である。内側は九層になっているがそのうち四層は天井裏にあたる間層である。遼代清寧2年(1056)の創建である。

4世紀末に鮮卑族が魏(386～534)を興して、398年に都を今日の大同におき、平城京と呼ばれた。それから洛陽に遷都する494年までのおよそ1世紀、大同はその中心であった。最盛期には100万を超える人口を擁し、当時は中国最大の都市であったといわれる。奈良の都が平城と称されたのも、北魏の都・平城にちなんでのことと考えられている。

## 6. 正倉院宝物と中国からの影響

正倉院宝物は台帳に記載されているだけで9000件を超えるとされる<sup>16)</sup>。さらに、1件の中に数百点を含むものもあり、ガラスや文書類などは台帳におおまかにしか書かれていないので、実際の数はいくらに凌ぐらしい。その正倉院の宝物の中に木製の宝物が多くみられる。これまでに、200点を超える木製宝物の樹種が調べられているが、それらには以下の用材が用いられている<sup>17)</sup>。

針葉樹材：ヒノキ、スギ、カヤ、イチイ

広葉樹材：ケヤキ、ムク、カシ、クリ、クワ、ホオノキ、クスノキ、イスノキ、サクラ、ツゲ、カエデ、アカメガシワ、カキ、キリ、ヤチダモ

渡来材紫檀、紅木紫檀、花梨、鉄刀木、黒檀、白檀、沈香単子葉植物：檳榔、タケ

上記のように渡来材が結構使われているのが一つの特徴である。日本と中国との文化交流を知る上で、次の二つの宝物に注目していただきたい。一つは木画紫檀双六局（モクガシタンスゴロクキョク）、もう一つは桑木木画碁局（クワノモクガノキキョク）でいずれも形状や造りがトルファン市のアスターナ墓出土品である小型の基盤の模型および小型の双六盤の模型に酷似している。トルファンはシルクロード沿線上に位置し、多くの遺跡があるところである。アスターナ墓出土の作品がシルクロードを経由して正倉院宝物に影響を及ぼしていても不思議ではない。これに関連して、正倉院宝物の特色について、「正倉院と日本文化」の著者は、以下のように述べている。「正倉院宝物の持つ特色を一つあげるといわれたら、宝物の国際性であろう。奈良時代文化の粋を集めた正倉院宝物の中には、中国・朝鮮などの東アジアの近隣諸国から伝わったものや、中央アジアの国や地域から、シルクロードを経てわが国にもたらされたものも多い。また、宝物自体はわが国で作られたものであっても、意匠や技法がそれらの地方から伝わっているものもある。したがって、「正倉院宝庫がシルクロードの終着点」とは名言だ<sup>16)</sup>。

## 7. おわりに

以上に述べてきたように、日本と中国は共に日華植物区系に属し、わが国の樹木の半数が中国にも生育している。植生の点からはきわめて似通った種類の植物が分布しており、かつ種類数も世界の中でもひときわ豊富にみられる。したがって、両国ともに古来より木の文化の発展があつてしかるべきである。実際に日本では遺跡の調査、木彫像、古建築いずれをとってみても木材の利用なくして文化は考えられないほど、木の文化を発達させてきた。これに対して、中国では少し様子が異なる。現在の中国においては木造建築はほとんどみられず、仏像彫刻や寺院建築も非木造が目立つ。しかしながら、昔の中国をみると、河姆渡（ホムドゥ）遺跡の高床式住居址、ニヤ遺跡の住居址、鄭和宝船、西漢の木廓や多くの寺院建築にみられるように、膨大な量の木材を利用した形跡がみられ、木の文化が発展していたことがわかる。中国においても、わが国のように遺跡の発掘調査、木彫像の研究、古建築の調査が進めば、木の文化の実態がさらに詳細に明らかにされるであろう。また、そこからわが国との文化の交流に関わる新事実がもたらされるであろう。中国において、さらには東アジアにおいて、今後ますます、木の文化を科学することの重要性を感じる。

## 参考文献

- 1) 中西 哲・大場達之・武田義明・服部 保、日本の植生図鑑〈I〉森林、保育社、1990.
- 2) 佐竹義輔・原 寛・亙理俊次・富成忠夫、日本の野生植物 I, II, 平凡社、1-321 (I)、1-305 (II), 1989.
- 3) 林 弥栄・古里和夫・中村恒雄、原色樹木大図鑑、北隆館、1-878, 1985.
- 4) 中国樹木志編纂委員会編、中国樹木志 第一巻、中国林業出版社、pp.1-929, 1998.
- 5) 中国樹木志編纂委員会編、中国樹木志 第二巻、中国林業出版社、pp.931-2398, 1998.
- 6) 中国樹木志編纂委員会編、中国樹木志 第三巻、中国林業出版社、pp.2399-3969, 1998.
- 7) 中国樹木志編纂委員会編、中国樹木志 第四巻、中国林業出版社、pp.3971-5429, 2004.
- 8) 尼雅遺跡学術調査報告書第二巻 本文編、日中共同ニヤ遺跡学術調査隊、177-183, 1999.
- 9) Newsweek Japan, Aug.16 発行, 52 頁, 2004.
- 10) 小原二郎、上代彫刻の材料史的考察、仏教芸術、No.13、3-21、1951.
- 11) 小原二郎、日本彫刻用材調査資料、美術研究、第 229 号、74-83、1964.
- 12) 金子啓明・岩佐光晴・能城修一・藤井智之、日本古代における木彫像の樹種と用材観—7・8 世紀を中心に—、MUSEUM (東京国立博物館研究誌)、第 555 号、3-53、1998.
- 13) 濱島正士、継手・仕口—日本建築の隠された知恵、株式会社 INAX、p.10、1988.
- 14) 伊原恵司、古建築に用いられた木の種類と使用位置について、保存科学、No.28、25-62、1989.
- 15) 布野修司編、アジア都市建築史、昭和堂、2003.
- 16) 米田雄介、正倉院と日本文化、歴史文化ライブラリー49、吉川弘文館、1998.
- 17) 正倉院事務所、正倉院の木工、日本経済新聞社、1978.

# 人工衛星から見る私たちの生存圏

塩谷 雅人\*

## 1. はじめに

人工衛星からの観測は、「神の目」ともいえる俯瞰的な視点で、大気圏、水圏、地圏、生態圏など人間生活に深く関わる領域(生存圏)に生起する現象を把握するための必須の手段となっている。我々が衛星からの地球観測という革命的な視点を持つようになって半世紀近くが経過しようとしており、これまでに5000を超える人工衛星が打ち上げられた。現在、われわれの身の回りには、身近なところでは気象衛星からの雲画像や、南極上空のオゾン分布を通してみるオゾンホールなど、いたるところに衛星からの観測情報があふれている。本講演では、人工衛星からの観測原理を簡単に紹介し、いくつかの観測事例にもとづきながら、来るべき将来に対する学術的な評価と理解を得るための研究基盤としての衛星からの観測について考える。

## 2. 衛星観測の原理

地球に関わるさまざまな情報を観測する衛星は、基本的には地球(あるいはその大気)からやってくる光や電波(電磁波)を測定する。たとえば、大気中の微量気体(水蒸気やオゾンなど)は特定の波長をもった電磁波を吸収あるいは射出しており、その強度を測定することによって存在量を求めることができる。人間には可視光しか見えないわけだが、さまざまな原理にもとづくセンサーを用いることによって特定の波長をもった電磁波の観測が可能になり、そこにはわれわれの眼に映るものとは異なる地球の姿が浮かび上がってくる。以下の図1は、気象衛星ひまわりから同じ時刻に2種類のカメラで見た地球の姿である。雲のパターンだけを見ると両者とも似ているが、よく観察すると異なるところがいくつか見つかる。(図の下の方は、どちらも欠けている。)どのような違いに気がついただろうか？

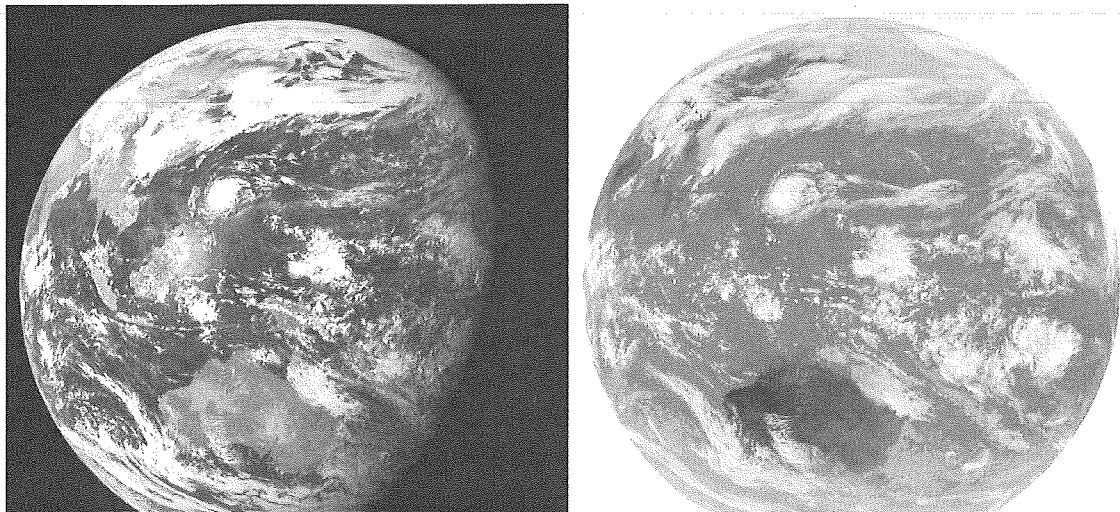


図1：気象衛星ひまわりの画像(左が可視画像，右が赤外画像)

\* 京大大学生存圏研究所大気圏環境情報分野



よく見ると右側の画像は地球がまん丸く映っているのに対して、左側の画像は右の方が欠けて見える。また、単純なことではあるが、右の画像の背景は白いのに対して、左の背景は黒くなっている。さらに、たとえばオーストラリア大陸(図の真ん中より下)を見ると、右は黒っぽく写っているのに対して、左は白っぽく写っている(海と陸の白黒度合いが逆になっている)。タネを明かすと、左側はわれわれがふつうに白黒写真で撮る地球の映像で可視画像と呼ばれる。いっぽう右側は赤外線領域の波長に感度を持つカメラで撮った地球の映像で赤外画像と呼ばれるものである。

可視画像はまさにわれわれの眼で見る地球が写っていて、衛星から見ると満ち欠けがあり夜の部分は黒くなっている。また、背景も黒い。雲は白く輝き、陸地は白っぽく、海は黒っぽく見える。いっぽう赤外画像は、可視画像で夜のところも含めて地球が丸く写っている。また背景は白い。ここにはちょっとしたトリックがあって、実は雲のパターンを可視画像と似せて見せるために、赤外線の強度と白黒の表現が可視画像とは違って逆になっている。つまり赤外線の強いところが黒く、弱いところが白くなっている。赤外線は、たとえば人間の体温ほどのものからも出ていて、物体の温度が高いほどたくさん射出される。つまり、夜の部分の地球もそれなりな温度ではあるので赤外線が射出されている。白黒が赤外線の強度と逆であることを念頭に置けば、背景は白く、暖かい陸地が黒っぽく、それよりも冷たい海が白っぽく、さらに夜の部分も見えることは理解できるであろう。それではなぜ雲が白い(赤外線の強度が弱い)のか？雲頂の気温はおおよそその高さのまわりの気温と同じくらいなので、背の高い雲ほど雲頂の気温は低い。つまり、そこから出てくる赤外線の量は、背の低い雲あるいは地表から出てくる赤外線の量と比べると少なくなる。結果的に赤外線の強度と白黒を反転させると、雲のあるところが(冷たくて)白く、雲のないところは地表付近の温度情報が見えるために(暖かくて)黒くなる。

そもそも、「昨夜からの雲の動きは…」とお天気番組ではやっているけど、夜なのにどうして雲が見えるの？という種明かしが、それは赤外線で観測しているからということになる。このように、さまざまな波長の電磁波の強度を観測することで、それまで見えなかった情報が見えてくるわけである。大気の観測では、紫外線や赤外線、マイクロ波などさまざまな波長帯の電磁波を観測することによって、大気中の微量成分(オゾンや水蒸気、メタンなど)の時間・空間分布が求められている。

### 3. 衛星観測の長所と短所－オゾンホールを例として

ひまわりの画像に次いで有名かと思われるのが、南極オゾンホールの衛星観測(オゾン全量分布)であろう。いまや、中学や高校の理科の教科書だけでなく、社会の教科書にまで取り上げられている。ここでは、オゾンホールの発見に関連したエピソードを通して、衛星観測の長所と短所について考えてみたい。

オゾンホールを最初に発見したのは、1982年から1983年にかけて南極昭和基地に越冬し自身がオゾンの観測をおこなった日本人研究者の忠鉢氏である。彼は、1982年の9月から10月にかけてのオゾン全量(ある断面積をもった大気柱の中のオゾン量を鉛直方向に足し合わせたようなもの)が、それまでの観測値にくらべて極端に低いことに気がついた。帰国後その結果を発表したものの、科学者共通の認識になるまでには少し時間がかかり、同じ南極域で観測を続けてきたイギリスのグループによる有力雑誌への発表によってこのオゾンの減少傾向がセンセーショナルに取り上げられるところとなった。オゾンホールと現在では称されるが、この段階では定点での観測からオゾンが急激な減少傾向にあることを示しただけであって、オゾンの少ない領域がぼっかりと穴の開いたようになっているという認識にまでは達していなかったと思われる。

さてそれでは、衛星観測は何をしていたのか？実は1970年代の後半から衛星によるオゾンの観測は継続的におこなわれていた。しかし、データ処理の段階であまりに低いオゾン濃度は有効な値ではないとしてはじくようになっていたらしい。そのため最初の発見から2年ほど遅れて、衛星からのオゾンホールの報告がなされた。一地点で観測されたオゾンの減少が、じつは南極大陸規模で起こって

いたことが明らかになって、大きな社会問題にもなったのはみなさんもお存知のところかと思う。

図2を見ていただきたい。これは、南半球(南緯30度よりも極側)10月平均のオゾン分布を1979年から1985年まで示したものである。南極上空を中心として、南極大陸の規模をもった非常に濃度の低いオゾンの領域が観測され、さらにその値が年々減少し、1979年には270という等値線値を読めるところが、1985年には180にまでなっている。オゾンはその後も減少を続けて1990年ごろには1970年代の約3分の1近くにまで減少した。現在その減少傾向は下げ止まっているようにも見えるが、その原因物質であるフロン(の一種)の利用制限を国際的な協定のもとでおこなったにも関わらず、現在もなおオゾン量は以前のレベルからは遠く低い値の状態にある。

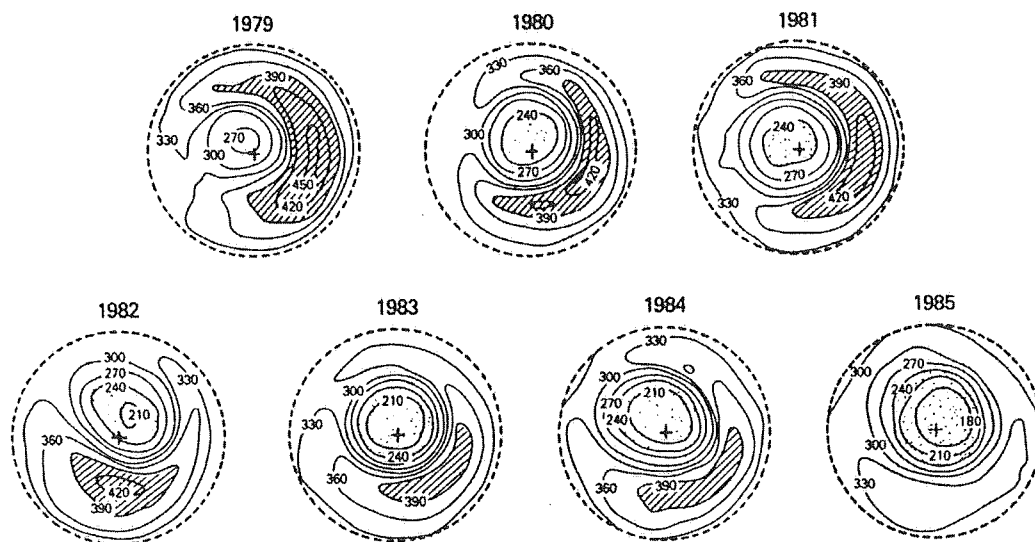


図2：人工衛星(TOMS)からの南半球域10月平均オゾン全量の観測  
(Stolarski など, 1986)

その空間的な広がりを見せつけられると、この現象の持つ意味合いが私たちにも直接的に伝わってくるように感じられる。衛星観測から得られるこのようなインパクトのある描像があったからこそ、オゾンホールと命名されたのであろう。このオゾンホールの例のように、グローバルな視点を持って現象を把握できることこそが、まさに衛星観測の最大の長所であるといえる。しかしいっぽうで、最初の発見が実は定点での地道な観測であったことは、衛星があまりに多量のデータを生成するがゆえに、じっくりとした考察を通してそこから浮かび上がる現象を見つめる視点にややもすると欠けてしまうという短所をあらわしている。ただしこれは衛星データの責任なのではなくて、それを見つめるわれわれの側に問題があるといえるだろう。大量の情報に埋もれることなく俯瞰的かつ総合的な視点を持ちながらそこから浮かび上がる物事の本質を見抜く作業と、いっぽうで少ない情報量の中でも想像力を膨らませる作業とが、それぞれどちらも重要であることをいまさらながらに認識させられるエピソードであるといえる。

#### 4. 地球を俯瞰する衛星観測

衛星観測は大気圏のみならず、水圏、地圏、生態圏などわれわれの生活に関わるさまざまな領域における広域的な情報を提供してくれる。以下では、先に見た大気圏におけるオゾンホールの例に加えて、水圏、生態圏に関連した例を2つほど見てみたい。

海は地球上の表面積の約7割を占め、大気との熱の交換を通して地球の熱収支に大きな影響を及ぼ

しており(また逆に大気は海洋の流れに対しても影響を及ぼしている), 海洋の広域にわたる観測はわれわれ地球の気候変動を考える上で重要な情報を提供する. 衛星からの観測としては, ほとんどは海面付近の情報となるが, 簡単などころでは海面水温の情報を得ることができる. 図3には衛星から観測された今年5月中旬の日本の太平洋側における海面水温の分布を示している(白っぽいところの温度は低く, 黒っぽいところの温度は高い). 遠州灘沖に南から流れ込んだ暖水塊が大きく蛇行している様子を見ることができる. いわゆる黒潮の大蛇行とよばれる現象である.

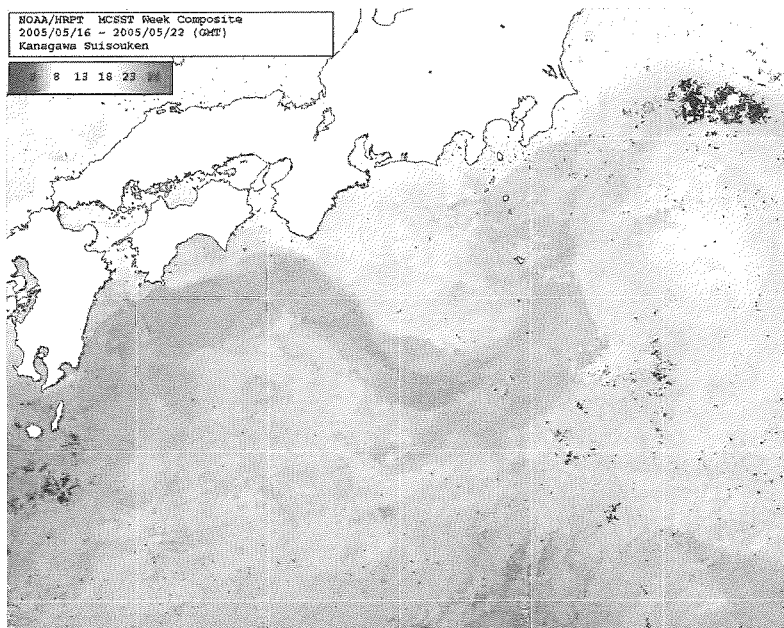


図3: 日本の太平洋側における海面水温分布(黒っぽく見えるところの水温が高い)  
(<http://www.agri.pref.kanagawa.jp/suisoken/noaa/noaa.asp>)

このほかに, 衛星から海面の高度を正確に求め, さらにそれにもとづいて表層の流れが推定されたり, 植物プランクトンの色素であるクロロフィル濃度の分布などが求められたりしている. 水温, 流れ, プランクトンに関するこれらの情報は魚の生息域と密接な関係にあるため, 漁業資源探査の観点からも広く活用されている.

衛星観測は生態圏に関してもさまざまな情報を提供してくれる. 植生の有無・活動性をあらわす指標として有名なものが正規化植生指標(NDVI: Normalized Difference Vegetation Index)である. これは, 植物の緑葉が青領域と赤領域の波長(R)を吸収し, 近赤外線領域(IR)の波長を強く反射する性質を利用したもので,  $NDVI = (IR - R) / (IR + R)$  のように求められる. この指数を広域で観測することによって, 季節とともに変化する植生の活動性を観察することができる. さらに植生指数の年々変動から, 雨が多く緑の豊かであった年や, 逆に雨が少なく旱魃に見舞われ緑の少なかった年の様子なども全球規模で把握することができる.

図4は1984年8月のアフリカ域における植生指数の平年値(長期間の平均値)からの偏差を描いたものである. カラーの原図を白黒にしたために少し分かりにくい, サヘル(サハラ砂漠の南端)から東アフリカにかけて植生指数が平年に比べ非常に低くなっている(黒っぽく見える)のが分かるかと思う. これはこの年その領域において雨が少なく, 緑も少なかったことをあらわしている. 実際のところ, この大旱魃によって飢饉が訪れ70万人もの死者が出たといわれている.

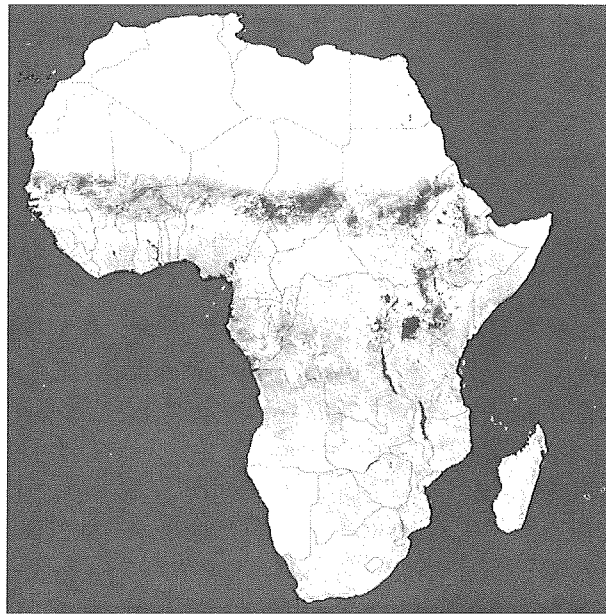


図4：1984年アフリカ域における植生指数の平年からの偏差  
(<http://earthobservatory.nasa.gov/>より)

これらの例は衛星から得られる情報のほんの一端であるが、衛星からのオゾンホール観測がその問題に対してわれわれの注意をひきつけたときと同じように、それぞれがもつ圧倒的な情報量を通してわれわれの地球に起こっている現象のすさまじさや重要性を認識させてくれる。

## 5. おわりに

衛星からの観測によって、我々を取り巻く環境とその変化はさまざまな観点から明らかにされつつあるが、そこから得られる大量の情報の理解にはおのずと総合的、大局的な視点が要求される。これは、ちょうど地球環境科学に関わる研究(あるいは生存圏科学に関わる研究)に要求される視点と共通する。すなわち、個別の学問領域にとどまることなく分野横断的で学際的な観点が必要とされる状況に似ている。ただし、圧倒的な情報を提供する衛星観測といえども万能ではない。精度・分解能といった点で地上からの定点観測や航空機観測などに及ばない場合も多い。少ない情報量の中で想像力を膨らませる作業と、大量の情報から俯瞰的に物事の本質を見極める作業を相補的に組み合わせることが重要である。こういった作業を通じ、私たちを取り巻く環境の変化を把握しそのメカニズムを解明することによって、この地球を将来にわたってどのように保全し治療してゆくべきかという問題に対する科学的な指針が得られるのである。

## 参考文献

- 1) Stolarski, R. S., Krueger, A. J., Schoeberl, M. R., McPeters, R. D., Newman, P. A., and Albert, J. C.: Nimbus 7 SBUV/TOMS measurements of the springtime Antarctic ozone hole, *Nature*, p. 811, 1986.

# シロアリと生存圏科学—シロアリは地球を救うか？—

吉村 剛\*\*

## 1. はじめに

これまでに世界で約2,600種類が記載されているシロアリは<sup>1)</sup>、最大の種類でも体長2センチ程度、日本に広く分布するヤマトシロアリにいたっては3~5ミリ程度と、まさにちっぽけな虫である。しかしながら、木材や木質材料だけでなく、樹木・農作物の大害虫としてもその悪名はとどろきわたっている。角田によれば、シロアリ被害にともなう費用は、アメリカ合衆国が最も多く年間約2,400億円、中国がその半分の約1,200億円、次いで日本の約1,000億円と推定されているが、ヨーロッパについてはシロアリの分布域と種に限られることから、全体で240~250億円程度と少ない<sup>2)</sup>。また、オーストラリアについては、600億円程度のマーケットであるとされている<sup>3)</sup>。中国以外のアジア諸国に目を向けてみると、インドネシアで年間200~300億円<sup>4)</sup>、マレーシアで10~20億円<sup>5)</sup>というシロアリ被害額が報告されているものの、その他の国については残念ながら信頼できる統計はない。アフリカ諸国と南アメリカ諸国についても、現在までのところデータはない。

では、なぜシロアリはこのように害虫として嫌われる存在となってしまったのだろうか。それは木材を餌として食べるためである。ではなぜ木を食べることができるのかと言えば、セルロースという地球上で最も豊富なバイオマス資源を利用することに成功し、その結果として最大数百万頭からなる巨大な社会を維持できるようになったからである。しかしながら、シロアリ界全体を見てみると、約半分の種類が土を餌としている、いわゆる「土壌食性」(soil-feeder)シロアリであり、シロアリ=木材害虫とは簡単に言い切れないところがある。実際、合計2,600種余りのシロアリのうち木材害虫としてリストアップされているものは、僅か4%程度、100種ほどに過ぎない。

本稿では、害虫として嫌われるシロアリの、生態系におけるエコシステムエンジニアとしての役割を紹介するとともに、その能力を生かした新エネルギーの創成の可能性について考えてみたい。

## 2. シロアリの生態的地位

### 2.1 世界におけるシロアリの分布<sup>6)</sup>

最新の研究成果によると、現在地球上では高等シロアリ1,885種、下等シロアリ753種、合計2,638種のシロアリが生活している<sup>1)</sup>。その分布の中心は熱帯から亜熱帯にかけての地域であり、生物区で言う新熱帯区(Neotropical:中南米地域)から481種、熱帯アフリカ区(Afrotropical:アフリカ大陸の地中海沿岸部を除く全域)から664種、東洋区(Oriental:中国南部からインド、マレー半島、インドネシアの一部を含む)から1,030種が知られている。ちなみに、日本を含む旧

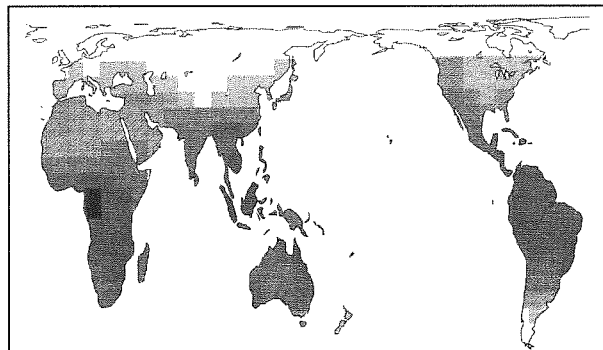


図1:シロアリの種多様性<sup>6)</sup>。

\* 2005年11月10日作成

\*\* 〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京大大学生存圏研究所居住圏環境共生分野. E-mail: tsuyoshi@rish.kyoto-u.ac.jp

北区 (Palearctic) からは僅か 40 種が報告されているに過ぎない。図 1 は世界におけるシロアリの種多様性をグリッドで表したものであり、色の濃い地域ほど種類が多いことを示している<sup>6)</sup>。これによると、最もシロアリの種多様性が高いのが中央アフリカの熱帯雨林地域、次いで東南アジアと南米の熱帯雨林地域となる。これらの地域では、数百種類というシロアリがいろいろな生活様式を示しながら共存し、確固たる生態的地位を占めているのである。図 2 には、インドネシア・西イリアン州において樹木に形成された *Microcerotermes* 種の巣とそこから伸びる蟻道を示しているが、ほとんどすべての木にこのような蟻道が這い上がっている。

## 2.2 シロアリの起源と害虫としての歴史<sup>7,8)</sup>

シロアリの化石は、樹液の化石である琥珀に閉じこめられた形で比較的多く算出される。現在知られている最も古いシロアリ化石は、スペインで発見された 1 億 3 千万年前のものである。これには明らかに職蟻と思われる個体が含まれており、すでにこの時代にシロアリの社会性が発達していたことを示す重要な手がかりとなっている。これを含めて白亜紀 (1 億 3 千 6 百万年～6 千 5 百万年前) のシロアリ化石 15 種が、ヨーロッパ、アジアおよび南北アメリカから採集されており、このことはシロアリが超大陸パンゲアの温帯域～熱帯域にかけて広く生息していたことを示している。さらに、現生のシロアリを見てみると、多くの科で類縁種が汎世界的な分布を示すことから、パンゲアに続くゴンドワナ超大陸が分裂する以前に科の分離・進化が生じたと推測される。つまり、現在見られるシロアリの多様性というものは、シロアリの祖先が、現在の大陸が形作られる前にすでに高い多様性を示し、繁栄していたことによると言ってもよい。

では、その繁栄はどのようにして得られたのであろうか。その理由として、微生物との消化共生系の確立と、ジュラ紀に起こった被子植物の爆発的な分布域の拡大を挙げることができる。いろいろな昆虫グループがこの被子植物の爆発的増加とともに進化してきたことはよく知られており、シロアリやアリ・ハチなどの社会性昆虫もまた例外ではないと考えられる。被子植物の多様性の増大につれて多様な生活空間 (生態的ニッチ) が創造され、微生物との共生系を築くことによってセルロースを餌とすることができるようになったシロアリは一気にその多様性を増大させ、その結果、生態系における数的に豊富な現在の地位を獲得したと考えられるのである。

上述したように、シロアリが人類の害虫となってから、つまり、我々の直系の祖先であるホモ・ハビリスが登場してから約 240 万年、さらにいわゆる文明というものが築かれてから約 5,000 年という期間は、シロアリの歴史から見ると昨日のようなことと言ってもよいだろう。現在でもアフリカなどでは群飛した羽アリのタンパク源として利用していることから<sup>9)</sup>、初期人類にとってシロアリは大切な食糧であったに違いない。また、同じくアフリカでは、シロアリの塚を掘り崩し、その土を畑の肥料に用いていることも良く知られている。

## 2.3 シロアリはどのくらいいるのか

エコシステムエンジニアとしてのシロアリを考える場合、まず熱帯におけるその圧倒的存在量に触れておく必要がある。動物の存在量の多さを示す一つの基準に、1 平方メートルあたりの湿重量 10 グラムというのものがあリ、シロアリは、ミミズ、サバンナの草食動物、そして人類とともにこれをクリアしている。これまでに報告されたシロアリの最大存在量は、カメルーンで 1 平方メートルあたり 100



図 2: インドネシア・西イリアン州の森林における樹木のシロアリ被害。

グラム以上、個体数として1万頭というすさまじいものがある<sup>10)</sup>。表1は、熱帯林、亜熱帯林及び温帯落葉樹林におけるシロアリなどの大型土壌動物の存在数と量をまとめたものであるが<sup>11)</sup>、熱帯林、特に熱帯多雨林ではシロアリの存在量が群を抜いて多いことがよくわかる。一方、温帯落葉林においては、ミミズの存在量が圧倒的になる。

ここで、日本の都市部、例えば京都におけるシロアリの存在量を計算してみたい。

- ・ 1ヘクタール（100メートル x 100メートル）に100軒の住宅があるとする。
- ・ 住宅の被害率を30%とする<sup>12)</sup>。
- ・ 京都に分布するヤマトシロアリの1コロニーあたりの個体数を最大30万頭とする<sup>13)</sup>。
- ・ 以上の仮定より、1ヘクタールあたりのヤマトシロアリの個体数は900万頭となり、1平方メートルあたりでは900頭となる。
- ・ これを湿重量に換算すると1頭を2ミリグラムとして、1.8グラムとなる。
- ・ しかしながら、この推定はすべてが最大値で計算しているため、実際にはこの値の数十分の一というのが妥当なラインであると考えられる。

この結果、驚くべきことに日本の都市部においては、西表島とあまり変わらないシロアリの存在量が推定されることになり、木造住宅の害虫としての重要性が再認識されるものとなった。言い換えれば、シロアリにとっては森にいるのも都市にいるのも、餌の存在量と言う点では全く何らかわりはなく、まさに木造住宅は都市の森林なのである。

表1：熱帯林、亜熱帯林及び温帯落葉樹林における1平方メートルあたりの大型土壌動物の存在数と量<sup>11)</sup>。

	熱帯多雨林		熱帯落葉林： タイ	亜熱帯多雨 林：西表島	温帯落葉林： 東北
	サラワク	パソ			
シロアリ	1,125 (1.78)	3,485 (9.41)	100 (0.09)	58 (0.12)	0
ミミズ	26 (0.65)	25 (0.18)	10 (0.38)	61 (7.48)	68 (17.75)
アリ	457 (0.47)	1,624 (0.82)	200 (9.17)	142 (0.17)	346 (5.45)
その他	280 (1.36)	253 (2.07)		251 (4.49)	
合計	1,888 (4.26)	5,387 (12.48)	310 (9.64)	512 (12.26)	432 (23.20)

注：数字は存在個体数（湿重量：グラム）

## 2.4 エコシステムエンジニアとしてのシロアリ

熱帯において著しい存在量を示すシロアリは、当然その餌であるリグノセルロースを出発点とする物質循環（＝腐食連鎖）に大きな役割を有している。例えば、ナイジェリアのサバンナでは、地表にあるリター（枯枝や落ち葉など）の55%がシロアリによって消費されるという報告もある<sup>10)</sup>。つまり、極端な話、シロアリがもし今地球上から消えてしまったとすると、熱帯ではリター類の分解の多くの部分が停滞してしまい、自然の物質循環に大きな支障が出ることは間違いない。

一方、シロアリは、直接的な腐食連鎖以外にも、その活動によってまわりの環境に大きな影響を与える。このような生物を「エコシステムエンジニア」と呼び、シロアリは、ミミズ、アリとともに熱帯における有名なエンジニアである。以下に、シロアリの持つ「エコシステムエンジニア」としての役割を挙げておく<sup>10)</sup>。

- ・ シロアリ塚への有機物やミネラルの蓄積。
- ・ セルロース分解性の細菌や菌類の繁殖による窒素の増加。
- ・ トンネルを掘ることによる土壌への水の浸透性の改善。
- ・ 結果として、例えば塚周囲の植物の成長を促進。

これらの役割を、アジア、アフリカの熱帯地域に多いキノコシロアリを例として図示したものが図

3である<sup>10)</sup>。

### 2.5 シロアリと生存圏科学

以上、シロアリという虫を弁護する立場からその生態学的な重要性について紹介してきた。しかしながら、森林資源の長期的な有効利用や住宅の防災という立場からは、その防除対策に真剣に取り組む必要があることもまた真実である。さらに、後述するように、シロアリはその発生するガスによって大気圏環境や地球温暖化現象とも深い関わりを持っている。

つまり、シロアリというものは、居住圏（都市圏）、森林圏、大気圏という、人間の生存基盤である「生存圏」全体と深く関わった生物であり、非常に魅力的な研究対象であると言える。

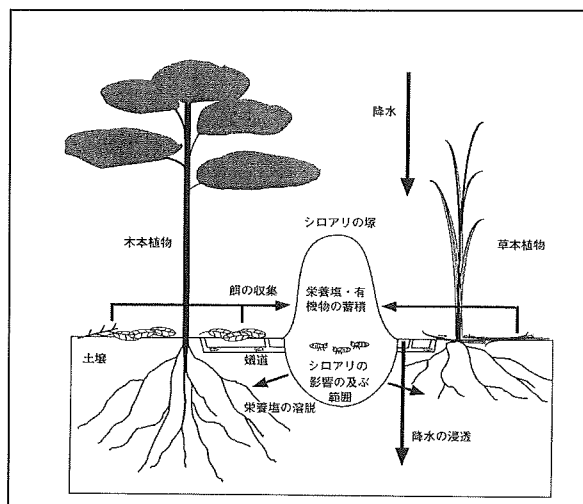


図3:「エコシステムエンジニア」としてのシロアリ<sup>10)</sup>。

## 3. シロアリによる新エネルギーの創成

### 3.1 新エネルギーオプションの現状

米国やオーストラリアが参加していないとはいえ、本年2月の京都議定書の発効は、二酸化炭素排出量の削減による地球温暖化防止に向けた大きな一歩であることは間違いない。化石資源に依存したエネルギー消費型社会はすでに限界点に達しつつあり、二酸化炭素排出の少ない新エネルギーオプションを活用した持続的社会的構築が21世紀の人類にとって急務の課題である。「生存圏科学」の究極の目標もここにある。

図4は、National Geographic誌2005年8月号に掲載された、2002年の世界のエネルギー消費に占める化石燃料とその他の新エネルギーオプションとの割合を、2030年の予測値とともに図示したものである<sup>13)</sup>。これによると、2002年の世界の全エネルギー消費のうち、原子力発電、水力発電、バイオマス発電、風力発電、太陽発電、潮力発電、地熱発電など、化石燃料に依存しないエネルギーソースは全体の約20%に過ぎず、残念ながらこの割合は2030年でもあまり変わらない予測になっている。

現時点では、こういった新エネルギーオプションはエネルギー変換効率やコストの面でまだまだ十分とは言えず、同記事中のインタビューでDan Kammen博士が述べているように、“The more we diversify our sources, the better”（より多くの新しいエネルギーソースを開発することが必要）を目指すべきであろう。バイオマス資源、特に圧倒的に存在する木質系バイオマス資源のエネルギーとしての新しい利用法の開発もその有力なオプションの一つである。

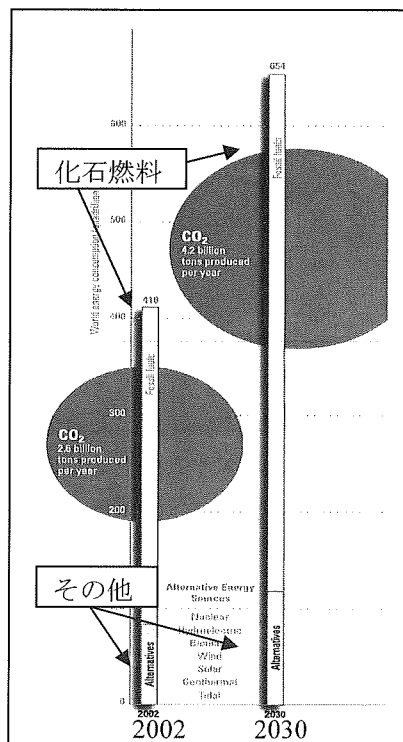


図4: 2002年の世界のエネルギー消費における化石燃料とその他の代替物の割合及び2030年の予測<sup>13)</sup>。

### 3.2 シロアリによるエネルギーガスの生成



それでは、シロアリを利用した新エネルギーオプションの開発にはどのような可能性が考えられるだろうか。

シロアリが消化管中に生息する細菌や原生動物との共生関係を築くことによって、セルロースを効率良く消化していることは良く知られている<sup>14-15)</sup>。本稿ではそのメカニズムについて詳しく触れることはしないが、木質バイオマスの分解におけるシロアリ腸内微生物相の役割に関する様々な研究から、原生動物および細菌によるセルロースの嫌気性発酵によって水素とメタンが定常的に発生し、新しいエネルギー源として検討する価値があることが見出されてきている。シロアリからの水素とメタンの発生については、

- ① 原生動物や細菌（例えば *Clostridium* 属細菌）によるグルコースの嫌気性発酵による酢酸、二酸化炭素と水素の生成： $C_6H_{12}O_6 + 2H_2O \rightarrow 2CH_3COOH + 2CO_2 + 4H_2$
- ② メタン菌による二酸化炭素と水素からのメタン生成： $CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$
- ③ 酢酸菌による二酸化炭素と水素からの酢酸生成： $2CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_3COOH + H_2O$

という3つの反応が関与していると考えられており、この結果、理想的にはグルコース 1 mol から最大 4 mol の水素が発生する可能性がある。このことは、1 モル 180 グラムのグルコース、つまり 400 グラム程度の木材から、最大約 90 リットルの水素が得られることを意味している。したがって、シロアリによる新エネルギーオプション開発のターゲットとしては、水素が最も可能性が高いと言えるのである。

ここで、水素のエネルギー利用に関する最近の情勢について少し紹介したい。水素は最も軽い気体であり、その燃焼時の発熱量は重量あたりでは大きく、二酸化炭素を発生しないが、4%以上の濃度で爆発する危険性があることからその保存には注意が必要である。また、水の電気分解の逆反応により、水素と酸素を反応させて直接電気エネルギーを取り出すことができる。この反応を行うのが、いわゆる燃料電池である。従来の発電が熱エネルギーや位置エネルギーを用いて発電機を回すことによって電機を取り出すのに対して、燃料電池では化学エネルギーから直接電気を取り出すことになる(図5)。

このように、燃料電池は二酸化炭素を全く発生しないクリーンなエネルギー源であると言えるが、水素は地球上に分子としてほとんど存在していないため、現実には何らかの原料から造ることが必要であり、そのプロセスにおける環境負荷を勘案しなくてはならない。燃料電池自動車の温室効果ガス排出に関するライフサイクルアセスメントを行った解析結果によれば、米国車を想定した場合、現行のガソリン車が 1km 走行あたり 300 グラムの二酸化炭素を排出するのに対し、ガソリンの改質によって取り出した水素を用いた燃料電池車が約半分の 150 グラム弱、太陽光発電で製造した水素を用いた場合排出量は 20 グラム程度と 1 割以下の環境負荷となっている<sup>16)</sup>。

次に、水素製造のための燃料としての効率を見てみると、化石燃料の中で最も効率が良いのがガソリンで、60 リットルから約 20 キログラムの水素を得ることができる<sup>16)</sup>。上述したように、グルコースの嫌気的発酵では 400 グラムの木材から最大 100 リットル程度の水素を得ることができるが、この質量は 8 グラムに過ぎない。つまり、60 リットル、比重を 0.5 と仮定すると 30 キログラムの木材から得られる最大水素量は 0.6 キログラムとなり、残念ながら効率の点で化石燃料などの炭化水素には及ばないのである。

このような背景から、筆者らの研究グループでは、

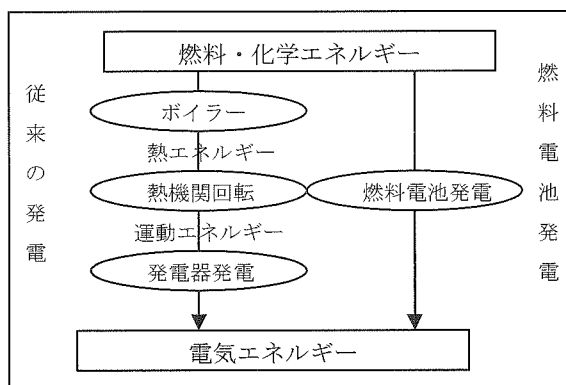


図5：燃料電池発電と従来発電のプロセスの比較<sup>16)</sup>。

現実的にはシロアリを用いた総合的な木質系廃棄物処理システムの中に、水素の生成—回収—利用というサイクルを組み込むことが重要であると考えている。

### 3.3 シロアリ水素の効率的利用を目指した取り組み

Sugimoto らの総説によれば<sup>17)</sup>、シロアリによる水素とメタンの発生量はシロアリの属や餌の種類によって大きく異なる。日本において木材の大害虫として著名かつ実験室での飼育が容易なイエシロアリは、同じく害虫として日本に広く分布するヤマトシロアリと比較して多量の水素を発生することが既に筆者らの研究グループによって確かめられている<sup>18)</sup>。したがって、現在我々は研究ターゲットとしてはイエシロアリを選び、効率的な水素発生条件について検討を行っているが、以下、これまでに得られた成果の一部を紹介したい。

シロアリによる水素発生を効率よく進行させるための方策としては、①原料であるグルコース、すなわちセルロースを多く摂食させる、及び②メタン菌や酢酸菌による水素の消費を押さえる、の2つの方向が考えられる。我々は、まず①についてどのようなタイプの餌の場合にシロアリが最も大量の水素を発生するかについて実験を行った。餌として、木粉、繊維状セルロース、微結晶セルロース、カロボキシメチルセルロース (CMC)、セロビオース及びグルコースをえらび、2日間絶食させたイエシロアリ職蟻に摂食させて、その水素発生率を測定した。なお、測定には半導体センサーを検出部に用いた水素用ガスアナライザーを用いた<sup>19)</sup>。

表2に結果をまとめて示すが、網掛けをした部分、繊維状セルロースを7日間以上摂食させた場合に、実験前の値を上回る最大2倍の水素発生率が得られた。このことは、餌を適切に選択することにより、シロアリによる水素発生量を増加させることができることを示唆している。また、セロビオースやグルコースといった低分子量の糖では、水素発生量は絶食後の水準にとどまったままであり、これらの物質がシロアリ消化管内で水素生成に関与する微生物にとって利用できないものであることが明らかとなった。

表2：各種セルロース系物質で飼育したイエシロアリ職蟻の水素発生率<sup>19)</sup>。

餌	水素発生率 (職蟻 1 頭 1 時間あたりの nmol 数)							
	絶食前	絶食後	1 日後	3 日後	5 日後	7 日後	14 日後	21 日後
木粉	1.72	0.15	0.41	0.66	0.77	0.73	1.30	1.01
繊維状セルロース	1.72	0.15	0.43	0.56	1.60	2.64	3.46	2.79
微結晶セルロース	1.72	0.15	0.25	0.66	1.09	1.41	1.95	0.85
CMC	1.72	0.15	0.33	0.15	0.42	0.51	0.56	0.65
セロビオース	1.72	0.15	0.20	0.12	0.15	0.15	0.18	0.10
グルコース	1.72	0.15	0.10	0.15	0.20	0.21	0.19	0.11

次に、②の方向について、メタン菌及び酢酸菌の活性を抑制する方法として、濾紙を各種抗生物質で処理しシロアリに取り込ませた場合の、水素発生量の変化を追って見た。表3にその結果をまとめて示すが、実験前と比較して2倍以上の発生率を示した場合を網掛けで表示してある。

5種の抗生物質の中では、ペニシリンの効果が最も早く発現し、1日後には実験前の4倍以上、職蟻1頭1時間あたり最大17.62 nmolの水素を発生した。この発生率は100万頭のコロニーが1日で約10リットルの水素を発生することを意味している。では、この最大発生率はグルコースからの変換効率としてどの程度の値になるのだろうか。1日職蟻1頭あたりの濾紙の摂食量を最大0.1ミリグラムと仮定すると<sup>20)</sup>、100万頭のコロニーでは100グラムになり、最大水素発生量は約25リットルとなり、変換効率は40%と計算することができる。この値がシロアリとして限界なのか、あるいはもう少し効率を上げることができるのかどうか、現在他の抗生物質等を用いた検討を引き続き実施しているとこ

ろであり、最終的には、バイオマス廃棄物の総合的な再利用システムの一部に組み込むことを目指している。

表3：各種抗生物質を取り込ませたイエシロアリ職蟻の水素発生率<sup>19)</sup>。

抗生物質	水素発生率 (職蟻 1 頭 1 時間あたりの nmol 数)				
	実験前	1 日後	3 日後	5 日後	11 日後
無処理	4.05	3.73	4.78	7.70	6.40
ペニシリン	4.05	17.62	16.89	12.15	9.68
カナマイシン	4.05	5.18	16.48	14.01	9.36
ストレプトマイシン	4.05	3.73	12.11	13.53	10.94
クロラムフェニコール	4.05	9.48	14.34	14.09	9.72
テトラサイクリン	4.05	7.41	17.29	12.64	10.89

#### 4. まとめ

以上、シロアリというちっぽけな害虫をめぐる「生存圏科学」について、筆者らの研究成果の一端とともに紹介してきた。これらの研究成果が、化石資源依存型社会から脱却し、太陽エネルギーに基盤をおいた真の持続的・再生的資源社会を支えるための技術開発に生かされることを切に願っている。

なお、本稿で紹介した研究成果は、日本学術振興会科学科学研究費「木材劣化生物を用いた保存処理木材のバイオプロセッシングと新規エネルギーの創成」(基盤A: 代表吉村 剛)による補助金によって得られたものである。

#### 参考文献

- 1) Kambhampati, S. and Eggleton, P., Taxonomy and physiology of termites, *Termites: Evolution, Sociality, Symbiosis, Ecology* (Abe, T., D. E. Bignell and M. Higashi eds), Kluwer Academic Publishers, 1-23, 2000.
- 2) 角田邦夫, 吉村 剛編, シロアリ防除に役立つ豆知識, (社)日本木材保存協会・西日本事業推進本部, 14-15, 2003.
- 3) Creffield, J. W. and M. Lenz, オーストラリアにおけるシロアリ制御の現状 1. 蟻害の程度, 被害の探知, 規格および木材・木質材料の保存処理, しろあり, No. 138, 31-33, 2004.
- 4) Yusuf, S., インドネシアにおけるシロアリ制御の現状, しろあり, No. 138, 22-24, 2004.
- 5) Lee, C.-Y., 半島マレーシアにおけるシロアリ制御の現状, しろあり, No. 138, 25-28, 2004.
- 6) Eggleton, P., Global patterns of termite diversity, *Termites: Evolution, Sociality, Symbiosis, Ecology* (Abe, T., D. E. Bignell and M. Higashi eds), Kluwer Academic Publishers, 25-51, 2000.
- 7) 角田邦夫, 吉村 剛編, シロアリ防除に役立つ豆知識, (社)日本木材保存協会・西日本事業推進本部, 2-3, 2003.
- 8) Thone, B. L., Grimaldi, D. A. and Krishna, K., Early fossil history of the termites, *Termites: Evolution, Sociality, Symbiosis, Ecology* (Abe, T., D. E. Bignell and M. Higashi eds), Kluwer Academic Publishers, 77-93, 2000.
- 9) 所 雅彦, サバンナのシロアリは植林木がお好き, 住まいとシロアリ (今村祐嗣、角田邦夫、吉村 剛編), 海青社, 115-126, 2000.
- 10) 陀安一郎, 熱帯の生態系とシロアリの役割, 住まいとシロアリ (今村祐嗣、角田邦夫、吉村 剛編), 海青社, 103-113, 2000.

- 11) 安倍琢哉, シロアリの生態-熱帯の生態学入門-, 東京大学出版会, 1989.
- 12) 森本 桂, シロアリの生態と被害, しろあり及び腐朽防除施工の基礎知識, (社) 日本しろあり対策協会, 11-37, 2005.
- 13) Perfit, M., Powering the future, National Geographic, August 2005.
- 14) Inoue, T., Kitade, O., Yoshimura, T. and Yamaoka, I., Symbiotic association with protists, Termites: Evolution, Sociality, Symbiosis, Ecology (Abe, T., D. E. Bignell and M. Higashi eds), Kluwer Academic Publishers, 275-288, 2000.
- 15) Breznak, J. A., Ecology of prokaryotic microbes in the guts of wood- and litter-feeding termites, Termites: Evolution, Sociality, Symbiosis, Ecology (Abe, T., D. E. Bignell and M. Higashi eds), Kluwer Academic Publishers, 209-231, 2000.
- 16) 文部科学省科学技術政策研究所 科学技術動向研究センター編著, 図解水素エネルギー最前線, 工業調査会, 269pp, 2003.
- 17) Sugimoto, A., Inoue, T., Tayasu, I., Miller, L., Takeichi, S. and Abe, T., Methane and hydrogen productions in termite-symbiont system, *Ecol. Res.*, 13, 241-257, 1988.
- 18) Miura, M., Yanase, Y., Fujii, Y., Okumura, S., Yoshimura, T., Imamura, Y., Maekawa, T. and Suzuki, K., Detection of hydrogen and methane from the feeding activity of termites using a gas analyzer, *Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Wood Science Symposium*, Sept. 17-19, 2004, Kyoto, 151-156.
- 19) Kawaguchi, S., Yoshimura, T., Imamura, Y., Miura, N., Yanase, Y., Fujii, Y., Okumura, S. and Suzuki, K., Energy gas production from wood biomasses by termites -A preliminary result-, *Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Wood Science Symposium*, Aug. 29-31, 2005, Bali, 198-203.
- 20) Yoshimura, T., Tsunoda, K. and Takahashi, M., Cellulose metabolism of the symbiotic protozoa in termite, *Coptotermes formosanus* Shiraki (Isoptera: Rhinotermitidae) IV. Seasonal changes of the protozoan fauna and its relation to wood-attacking activity, *Mokuzai Gakkaishi*, 40, 853-859, 1994.