宇宙への定住計画

—閉鎖空間内での生命維持—

Pioneering Settlement in Space —Life Support in Closed Environment—

新田 慶治

Keiji NITTA

● 1934年8月7日生
● 昭和33年早稲田大学応用物理学卒業後、直ちに航空技術研究所入所、YS-11の飛行計測、ロケットの誘導制御等の研究に従事、現在、生命維持の研究に従事
● 科学技術庁航空宇宙技術研究所（〒182 調布市深大寺東町7-44-1）

Key Words: Settlement, Habitation, Ecology, Material Circulation, Environmental Control

1 はしがき

我が国の経済力の向上に伴い、科学技術分野においても、それ相当の国際的な役割を果たすことが要求されるようになって来た。宇宙開発分野でも、国際的な宇宙ステーション建造計画に参加するとか、宇宙ステーションを利用した国際的な宇宙実験計画への参加など国際化の波がうねり始めている。これを機に、我が国としてもこれまでのような無人の宇宙活動だけでなく有人でも宇宙活動を行い、世界的に貢献して行く必要があるとの考えが次第にクローズアップされて来た。残念ながらこれまで我が国では自らの手で人間を宇宙に送り込むという計画がなかったため、一部の研究機関で細々と人間を宇宙で活動させるのに必要な諸技術の研究が行われて来たが、システムチックに研究開発が行われて来ている米ソに比べ大幅な遅れをとっていることは否定出来ない事実である。しかし今回、国際的宇宙ステーションの建造と利用に参加することによって、これまでアメリカが蓄積して来た有人サポート技術の多くのものが修得出来るであろう。

勤勉にして着実な発展をし続けて来た我が国の宇宙研究開発活動も、既存の最先端技術を掌中におさめることが出来るのも、まじかなことと考えられる。しかし、今後の宇宙開発で我が国に期待

されていることは、このような既存技術の修得ではないことは、明らかであり、我が国の経済力を基盤として、今後米ソが研究開発を進めようとしているまったく新しい分野での国際協力が大きな課題となる。このためには大きなハードルを超える必要があり、民・学・官での総合的な技術開発プログラムが必要となろう。

2 宇宙インフラストラクチャー

ここ数年来、宇宙インフラストラクチャーの論議が世界的に広まっている。宇宙インフラストラクチャーの話は宇宙研究開発に日ごろ携わっている人々にはファミリアな事であるが、単なるロケットや衛星と言った個々のハードウェアを考えるのではなく、宇宙空間に浮かぶ施設、地上と宇宙空間の間を行き来する輸送系、地上の実験施設または産業施設などを、一体として取扱い総合的に運用しようと言うものである。現在進められている国際的宇宙ステーションの建造もアメリカの宇宙インフラストラクチャーの一環となることは間違いないところであるが、今後アメリカとしてどのような宇宙インフラを築いて行くかは、1986年5月に出版されたいわゆるペインレポートにまとめられている。それによれば、地球の周りを回る宇宙港、月の周りを回る宇宙港、火星の周りを回る宇宙港をそれぞれ建造し、地球と火星を周回

するフェリーを開発し、月基地や火星基地を建造して行こうと言うものである。期間としては21世紀の中期ごろまでに実現することを目標としている。我が国でも日本独自の宇宙インフラの建造が必要であると考えており、21世紀の初期ごろには、独自の有人プラットフォームを建造する計画が現在検討されている。

③ 宇宙定住の可能性

我が国の宇宙研究開発は科学衛星や通信衛星などの実用衛星開発とこれらの衛星を打上げるためのロケットの開発が中心となって来た。国際的宇宙ステーション計画に参加する段階になり急に有人宇宙計画への指向性が関係者間で高まって来ているが、本当に我が国が独自で宇宙での有人活動を行うだけの技術ポテンシャルはあるのか、また独自で有人宇宙活動を行うにはそれなりの経費を要することでもあり、その価値があるのかと言ったささやきがよく聞かれる。またこれに対して、日本も経済的な大国になったのだから、我が国の自主性を保ちながら、このような先端的技術開発分野でも世界的な貢献を行うべきであると言う声も聞かれる。いずれにしても、金融ならびに経済の国際化が進むなかで、宇宙研究開発だけが孤立した状態で進められるわけではない。我が国も宇宙有人活動計画を持たざるを得ないのは目に見えているわけであり、ここで宇宙での定住性について論じて、そう奇異なことにはならないであろう。

地球を離れること80～100 kmで、地球を覆っている大気の密度は希薄になり真空と言ってもよい状態になる。米ソのこれまでの有人宇宙活動で何とかこのようなところにでも人間が行って帰ってこられることは明らかになっているので、単に宇宙を往復するだけであれば、そう問題がないと言えるであろう。何が問題になるかと言えば、長期間宇宙に滞在し活動する際に生じる輸送費の問題、地球環境に及ぼす影響、宇宙症候群と呼ばれる人体への影響であろう。輸送費について言えばスペースシャトルで1飛行当たり200億円以上を要するので人間が宇宙に滞在するのにどの程度の物資が必要かが問題となる。表1に示すように人

表1 人間1人当たりの物質平衡(グラム)

供給物質		排せつ物質	
食糧	567	大便	68
水		水蒸気	
食糧中の水分	227	汗	803
飲料水	1868	呼吸	349
		水分	
		小便	1200
		大便	150
シャワー等	25000	シャワー等	25000
酸素	907	炭酸ガス	999
合計	28569	合計	28569

間が生きるためには1日当たり約30 kgの物資が必要でありこれを輸送費に換算すると年間で150億円と言ったような金額になる。この問題を解決するには、輸送能力の高くかつコストの低い輸送系(ロケットや有翼の有人宇宙機)を開発することと、物資を補給しなくても人間が生存出来る自給自足の技術を開発することで解決されるであろう。地球環境に及ぼす影響としては、ロケットや有翼の有人宇宙機の打上げ時の環境破壊であり、特に打上げ時の放出ガスで大気のオゾン層が破壊されることを防ぐことが出来るかと言う安全課題となろう。これも輸送系の問題と大きくかかわって来る。宇宙症候群に関してはこれまでの有人飛行によってかなり問題点が明確になっている。最も問題になる点は、長期滞在になった場合、無重力状態に馴れ切った心臓の働きが地上に帰還した時に1Gと言う重力に直ちに適応出来るかと言う点と、無重力状態では骨のカルシウム分がぬけてぜい弱化して行くので地上に帰還出来るのかと言う点であろう。このような問題点を解決して行くためには、出来るだけ輸送回数を減らすことと、一端宇宙へ入ったら地上と同じような生活が出来るように、人工重力をもつステーションや宇宙港を建造することが要求される。このような人工重力を持ちかつ、食料の生産や廃棄物の処理が可能になる居住技術が開発されれば、宇宙定住の可能性が高まって来るわけである。

④ 宇宙定住に必要な基本的な技術

人工重力を持つステーションや宇宙港を開発す

るには、人工重力部と回転のない無重力部をどのように結合するか、回転する人工重力部の姿勢安定をいかにとるかなど多くの解決しなければならない問題があろう。これらの問題はどちらかと言えば機械工学的な問題が主になって来るが、一方居住技術に関しては、米ソがこれまで積み上げて来た有人宇宙飛行では、人間が生活するために必要となる物資はすべて地上から持って行き、消費され排せつされた全物資を地上に持ち帰る方法であったが、定住するためにはその全物資をリサイクリングしなければならないわけで、質的に大幅に異なる。しかし、広い宇宙空間の中で、我々の住む地球そのものを考えてみると、物質的には隔離された閉鎖空間の中で物質が循環し、人間を含む生態系が維持されている唯一の天体と考えられるであろう。従って地球上の生態系がいかに保たれているかを眺めてみることは無益ではない。図1に示すように生物の体を構成する元素のうち炭素の年間の循環量を示したものであるが、植物が空中の二酸化炭素を取り込み酸素を空中に放出し動物の食料となる有機物を合成し、動物は植物の放出する酸素と有機物を摂取し、二酸化炭素と排せつ物を放出していること、また動物の排せつ物と動物が摂取し残した植物や動物の遺体をバクテリアが分解し、二酸化炭素を放出していることが

明確にされている。すなわち動物と植物は物質の循環と言う観点から見るとまさに、相補う関係にあるわけになる。しかしよく図を見ると動物や植物ならびにバクテリアが含む炭素量と、それぞれの生物が吸収したり放出したりする炭素移動量とを比べるとかなり大きいことがわかるであろう。このことは各生物の炭素量が完全に置換される時間、すなわち平均滞在時間は、1年とか10年と言うオーダーであり、相当ゆっくりとした物質移動であることがわかるであろう。このようなゆっくりとした物質の移動でも、生物が、生き長らえて行けるような酸素や二酸化炭素濃度の環境が一定に保たれていることである。逆に考えれば、ステーションや宇宙港のような人工的な構造物では地球上のような広大な面積や体積を持つものを作るとはむずかしいことは明白であるので、当然ながら地球のような大きな物質のバッファを持たせることは困難になることは容易に想像されよう。しからば、このようなバッファ容量の少ないステーションや宇宙港のような狭い場所で、地球のような閉鎖された空間内で人間を含む生態系を維持出来るようにするためにはどうしたら良いのであろうか。このためには図2に示す物質循環の中で各生物に適したガス環境を維持しながら各生物が生きて行くために必要な代謝量と一致した酸素とか

図1 地球上の炭素循環（服部明彦を改編）

二酸化炭素などのガスをいかに正確に循環させるかが問題になる。しかもこのようなガス循環とガス環境だけでなく、植物の非可食部や動物の排せつ物も、動物の食料となる植物を栽培するための養分に完全に変換し循環させることも同時に実現しなければならない。

特に図1において問題となるのは動物の排せつ物や遺体がバクテリアで分解される場合の炭素の平均滞在時間が長いことであり、図2における排せつ物の分解システムに、バクテリアなどの微生物を摘要するとすると、小容積の分解槽では処理し切れず、排せつ物や植物の非可食部が蓄積して行くことになる。また排せつ物分解に用いられている微生物は一般に単一微生物ではないので、病原菌が発生しこれが漏れいし環境破壊を起こすことも十分考えられる。従ってこのような小空間での排せつ物処理には必然的に物理化学的な処理で対応しなければならない。現在最も可能性の高い方法として考えられているのは、触媒を用いた湿式酸化法と呼ばれる方法である。各種宇宙港

や月基地などの建設を考えた場合、当初は地上から建設材料を運搬しなければならないことから考え、食料に関しても高能率の生産が必修のものとなることは明白である。植物の歴史は、図3に示すように、我々の動物の歴史に比較にならないほど長く、分子状の酸素のなかった地球上のガス環境を現在のような大気を作るのに大きな役割を果たして来た。このような歴史的背景があるため植物の遺伝子の内には、現在の地球上の酸素24%、窒素78%、二酸化炭素0.03%の成分よりも、酸素濃度が低く、二酸化炭素濃度が高い環境により良く適応し育つ能力を実現させる情報を蓄

図 3 地球の生物進化

図 2 閉鎖生態系システムの概要

えているものがあり、このような能力を引き出すことによって、現在地上で考えられないより小さな作付面積で人間の必要とする食料を生産することが可能であることが、種々の実験から明らかになって来ている。このためには我々人間の住む居住区と食料となる植物栽培区とは異なるガス成分を供給することが要求されることになるので、人間や動物ならびに排せつ物の分解によって放出される二酸化炭素や植物類の放出する酸素を分離貯蔵し、所要の成分に調整し、居住区や栽培区に常に供給出来るようにすることが必要になる。二酸化炭素と酸素をそれぞれ分離貯蔵するためには固体アミンならびにサルコミンの化学吸脱着反応の利用が検討されている。図4はアミンの二酸化炭素の吸脱着反応である。図5はサルコミンの吸脱着反応でありいずれも常温で吸着し、高温で脱着

することを示している。また人間にしても植物にしても水の存在は不可欠であり、使用済みの排水を浄化し循環させることは生命を保つ上からも必要であり、膜分離や蒸留法についても検討が行われている。

5 物質循環における問題点

以上述べたような基本的技術を発展させるだけでは、宇宙定住を実現することは困難である。特に初期段階での人間の定住に必要な空間は、出来るだけ小さなものでなければ建設費や輸送費の観点からみて実現性はないことは当然であり、小さな空間と言う観点からみて、解決しなければならない問題が山積している。第一に微量の有害ガスの発生の問題がある。植物の栽培ですらエチレ

図4 アミンの二酸化炭素吸脱着反応

図5 サルコミンの酸素吸脱着反応

ン、一酸化炭素、アンモニア、酸化アミン、シアン化合物、窒素酸化物、硫化物などが発生することがわかっている。地球上では、これらの物質はすぐに拡散し、大気循環によって海面に達し吸収されるが、宇宙での定住区では蓄積される可能性が非常に大である。これらのものをどのようにして、どの程度まで分解制御しなければならないのか、今もって十分なデータが蓄積されていない。また栽培区の各装置から溶出する重金属イオン、例えば、亜鉛、カドミニウム、ニッケル、クロム、銅、コバルト、銀、鉛、アルミニウムなども大きな問題となる。これらをどの程度に押さえるかは、それぞれの許容量を明らかにすると同時に溶出防止対策をこうしなければならない。また重金属だけでなく地上では特に問題とならないペンキ、シール材、ガasket、ゴムなどから放出される有機微量ガスも有害であるので十分な対策をしなければならない。第二の問題としては、人間の消費量に合致した酸素量とか食料の量を得るためどのようにして植物の光合成量を制御するかと言う問題が生ずる。

人間や動物の必要とする酸素や食料の量は環境によって制御することはたいへんむずかしい。植物に関してはある程度の制御は可能と考えられているが、どのように制御したら良いかは今後の問題となっている。ちなみに植物の光合成を制御し得る要因は、温度、湿度、風速、二酸化炭素や酸素の濃度と言ったガス成分、光のスペクトル分布、照射時間・照度といったパラメータが考えられるわけであるが、このようなパラメータの制御によって光合成がどのように変えられるかと言った十分なデータが各植物種について蓄積されていない現状である。また人間や動物と植物とは相補う関係にあると言っても、人間が酸素を二酸化炭素に変換する比率（呼吸商と呼ばれ $\text{CO}_2 \text{ mol}/\text{O}_2 \text{ mol}$ で表される）と植物が二酸化炭素を酸素に変換する比率（同化商と呼び $\text{CO}_2 \text{ mol}/\text{O}_2 \text{ mol}$ で表される）は必ずしも常に一致しない。このため酸素の濃度を一定に保とうとすると二酸化炭素の濃度が増えたり、減ったりする。また逆のことも起こり得るわけであり、光合成の制御だけでガスのバランスを保つことは困難となることも種々の

解析からわかっている。物理化学的装置を用いてどのようにしてバランスを取るかも今後の課題と言える。

6 地上閉鎖実験の必要性

以上の事柄から判断出来るように、単に植物や人間を閉鎖すれば宇宙定住が可能になるわけではない。これらの問題を解決するためには、地上での模擬実験が大きな役割を果たすことは間違いない。前章で述べた問題点を解決するためには、まったく新しい研究が必要になるわけであるが問題解決のための実験では人間を対象としたスケールの実験施設が必要となる。現在、アメリカではテキサスの石油資本家の出資でバイオスファアIIと呼ばれる実験施設の建設が検討されているが、物質循環については、まだ十分な考慮がなされておらず、生態系が崩壊する恐れが強い。特にこのバイオスファアIIを小形化するとその傾向はますます強まることが予測される。有害物質（微量有害ガスとか、生態系に有害な菌類）の徹底的除去と徹底的なガスバランス技術の開発の必要性が地上の閉鎖実験によって明らかにされることとなるう。

7 おわりに

我が国ではここ10年ほどの間に、省エネ技術と公害対策技術が大きく進展し、今後の経済発展を築く基礎を作った。宇宙定住計画は21世紀と言うこれから10～15年先の計画である。宇宙定住に必要な閉鎖された生態系を作り出す技術は、これまでつちかって来た我が国独自の技術を発展させることでもあり、また宇宙に限らず現在我々が定住している地上環境改善の技術でもあり、波及効果は計り知れないものがある。単に宇宙での人間の生存と言うだけでなく地球も宇宙内の一つであり、宇宙定住計画に盛られている技術開発は全人類が永続的に発展するための技術開発の一環であるとの認識が必要であろう。

（原稿受付 昭和62年12月1日）