

月面基地，火星基地構想とそのエネルギー，物質的な側面

Lunar Base and Mars Base — Their Energy and Material Resources —

石川 洋二*

Yoji Ishikawa

1. まえがき

人間の居住地を考える場合、それがどこであれ、人間のもっとも快適に生活できる環境を用意するのが原則である。地球外に居住しようという場合も例外でなく、居住環境、建築物、呼吸気、食料などの人間の基本的な要求を満たさなければならない。ここで問題になるのは、そのような居住地に必要な物質を運ぶための輸送コストの高さである。輸送量にコストの面から制限がつくからには、現地の資源をなるべく使った居住地作りが図られなければならない。したがって、以下では、資源の面から見た地球外居住地の設計について述べる。

人間が地球外に居住地を広げるとして、この数十年の間にはいったいどこまで進出していくのだろうか。温度の面から見て限界と思われる木星より内側の居住地の候補について、居住性の比較をしてみたのが表1である。これから分かるように地球に住み慣れた人間に

とってなじみやすい場所は、近いところで月、少し離れて火星であることが分かる。したがって、ここでは、月と火星に焦点をあて居住環境作りの可能性を論じてみたい。

2. 月面基地の物質・エネルギー的側面

2.1 月とは

月は人類が訪れた唯一の地球以外の天体であり、約20年前に行われたアポロ計画による月面の様子を覚えておられる方も多いだろう。月の半径は地球の四分の一であり表面での重力は約六分の一である。したがって、月面上では誰もが高く飛び上がれるし、地球では考えられないような建築物の構築も可能である。ただし、表面上には大気がなく超高真空の世界である。このために表面での温度の変化は激しく、昼間の最高130℃から夜間の最低マイナス170℃まであわせて300℃の温度変化がある。ただし、地下1メートル入れればマイナス20℃ほどで一定である。月の1日は地球で

表1 地球近傍の居住環境比較

居住地の候補	太陽からの距離 ^{*1} (地球を1とする)	重力 (G)	地表大気温度 ^{*2} (℃)	地表大気圧力 (気圧)	生命維持のための資源
水星	0.39	0.38	----	0	なし
金星	0.72	0.93	477	90	二酸化炭素、窒素、水蒸気
地球	1.00	1.00	13	1	水、酸素、窒素、二酸化炭素
地球周回軌道 (低軌道、静止軌道)	1.00	0	----	0	なし
月	1.00	0.17	----	0	酸素
ラグランジュ点 (L4, L5)	1.00	0	----	0	なし
火星	1.52	0.38	-58	0.01	水、二酸化炭素、窒素
火星衛星(フォボス、 ダイモス)	1.52	~0.001	----	0	(水素、酸素、炭素) ^{*3}
小惑星	2.2~3.5	0~0.01	----	0	(水素、酸素、炭素) ^{*3}

*1軌道長半径 *2平均値 *3存在が推測される元素資源

※ラグランジュ点……宇宙空間にある三つの天体(物体)の重力が、もっともバランスのとれた点(地域)をいい、宇宙ステーションやスペースコロニーなどの宇宙構造物の建設に適している。

* 榎大林組 宇宙開発プロジェクト部長代理

〒101 東京都千代田区神田司町2-3

いうところの約29日半続く。すなわち、昼夜がそれぞれ14日ずつあるので人間の生活リズムや太陽光エネルギーの利用には工夫が必要となる。地震は月では稀なので建造物の設計には考慮する必要がない。ただし、磁場および大気がないので人体に有害な宇宙線が容赦なく表面に降り注ぐ。そのためには建造物の壁を厚くしたり、厚い覆いかぶせたりなどの配慮が必要となる。

2.2 月面基地「月面都市2050」構想

1960年代から70年代にかけて米国で推進されたアポロ計画終了後月面開発についての大きな動きはなかったが、最近になって今度は滞在するために月に戻るといふ機運が米国で高まってきている。有人月面開発や月面基地のシンポジウムもここ数年米国を中心に開かれており、輸送技術、建設技術、今後の課題などが明らかに becoming なる。

月面基地の建設は来世紀の初頭にも建設が開始されると考えられるが、その意義は3つ考えられる。

(1) 科学的な意義

月面上は、大気もなく、地震もないので天文観測の絶好の環境を提供する。また、月の裏側は地球からの電波が届かないので電波望遠鏡の最適な設置場所である。また、月自身の研究は、地球や太陽系の起源を知る上で役立つ。

(2) 資源利用の意義

大型の宇宙ステーションや太陽発電衛星が将

来建造されるようになるとその材料は地球から運ぶより月から運んだほうが効率が良い。後述するように月には各種鉱物、金属資源が存在するのでその材料が使用できる。また、月の鉱物には半分近く酸素が含まれており、生命維持のための資源に利用が可能である。エネルギー源としては表土に含まれるヘリウム3を地球に輸入して来世紀の代替エネルギーとして利用するという構想もある。

(3) 宇宙進出の前進基地としての意義

将来火星などへと人類がその領域を広げていくときの前進基地であり、燃料の補給基地となりうる。

以上の意義を考慮して構想した2050年の月面基地の概観を図-1に示す。

月開発の発展を考えると来世紀半ばには月面上で都市とも呼べる規模の居住地が達成されると考えることができる。ここでは、2050年に人口1万人、観光、商用などの目的の短期滞在者を2千人と考えた。これは、規模としては伊豆大島に匹敵する。

2.3 月の物質資源

アポロ計画の主要な科学的成果が、6回の飛行で持ち帰られた382kgの月の表土や岩のサンプルであったことを見て分かるように月の物質資源としては、表層物質において他にない。アポロ着陸船は、月の海と呼ばれる低地の黒く見える部分と、高地と呼ばれる部分から表層物質を採取してきた。それぞれの砂の化学組

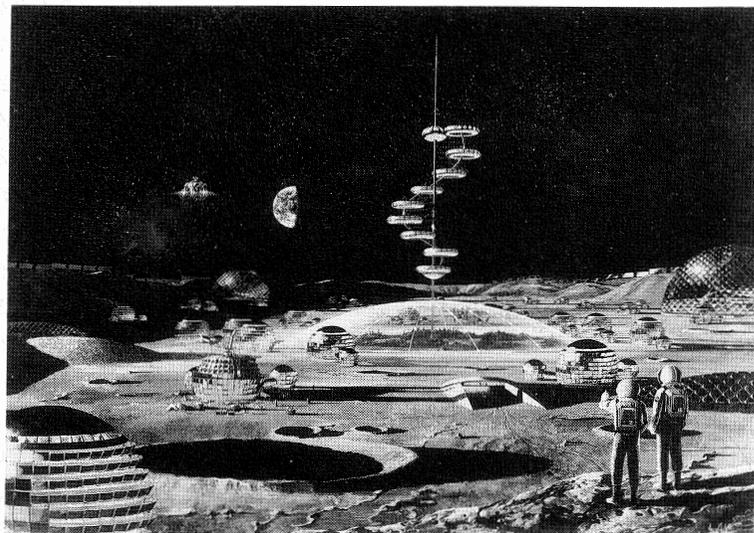


図-1 月面基地概観

表2 月の砂の化学組成¹⁾ 主成分 (%)

化学成分	海の土	高地の土
シリカ (SiO ₂)	42.16	44.77
アルミナ (Al ₂ O ₃)	13.60	28.48
酸化カルシウム (CaO)	11.94	16.87
酸化鉄 (FeO)	15.34	4.17
酸化マグネシウム (MgO)	7.76	4.92
酸化チタン (TiO ₂)	7.75	0.44
酸化クロム (Cr ₂ O ₃)	0.30	0.00
酸化マンガン (MnO)	0.20	0.06
酸化ナトリウム (Na ₂ O)	0.47	0.52

成を表2に示す。海ではFe, Tiが多く、高地ではCa, Alが多い。鉱物でいえば、海では玄武岩が主な鉱物であり、高地では斜長岩からなっている。これ以外にも発見されている鉱物は、長石、橄欖石、輝石、チタン鉄鉱などであった。なお、これらの鉱物の中には現在も過去にも水が存在した痕跡は見いだされなかった。月面上では水がないために、岩石は物理的な風化しか受けていない。すなわち、太陽光を受けて熱せられた岩石が熱膨張率の違いによって破砕されている。粉砕されて細くなった砂は表面を覆い月の「レゴリス」と呼ばれている。月では大気がないので隕石が表面に衝突する。この衝撃によって、ガラス質の物質も形成されている。

また、酸素は元素組成の40%強を占めている。微量

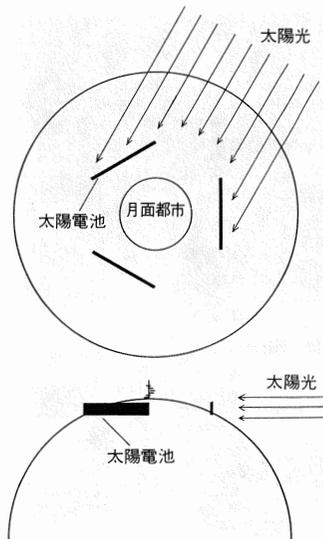


図-2 月面基地の太陽パネル

ではあるが、太陽風が水素、ヘリウムなどの元素を運んで来て、それらが表土の表面に吸着している。

2.4 月のエネルギー資源

月で考えられるエネルギー資源は、太陽光とヘリウム3を用いた核融合である。

月では太陽光はなんら減衰を受けることなく表面に到達するが、基地への基給を考える場合昼夜がそれぞれ14日ずつ続くことを考慮する必要がある。すなわち、夜の間の14日間をなんとか工夫しなければならない。このために常時月面上で約1kW/m²の太陽エネルギーを常時利用するには、基地を極地方に建設することが提案されている。図-2に示すように太陽電池を張りめぐらすことによって月面都市には昼夜の別なく常に電力が供給される。

ヘリウム3については次節で述べる。

2.5 月での資源抽出と建材作製

月での資源抽出としては、酸素、水素、ヘリウム3、そして建材としての利用としてのアルミ、鉄がある²⁾。

酸素は月でもっとも大量に生産されると推測される資源であるが、推進用の酸化剤、生命維持のための循環物質として使われる。酸素は表土中の酸化物から抽出されるが、効率がいいのはチタン鉄鉱から取り出すことである。したがって、チタン含有量の多い海の砂を用いるのが良い。

水素は、推進系の燃料、生命維持のための水の構成要素として利用される。水素は太陽風の表土への堆積物となって月面上に蓄積しているのみなので、相対量としては非常に少ない。表面から10cmまでの深さの砂を加工するとして1tonの水素を得るためには0.7km²の広さの砂を集めなければならない。ただし、水素の抽出にはただ熱を加えるだけで良い。

ヘリウム3は、地球ではほとんど実質的に採掘することはできない。月のヘリウム3は水素と同様に太陽風によってもたらされたものだが、月での採掘は現実的なものと考えられている。ヘリウム3は将来のエネルギー供給源と考えられる核融合の原料として注目を浴びるようになった。通常原料とみなされるトリチウムの反応が多くの高エネルギーの中性子を発生し炉を傷つける心配があるのに対し、ヘリウム3はそのような中性子を発生しない。加えて、トリチウムと違い、ヘリウム3は放射性元素ではない。ヘリウム3は水素と同様加熱によって抽出することができるが、1tonのヘリウム3を得るためには、深さ10cmの砂を2000km²にわたって集めなくてはならない。

アルミは、構造材、コーティング材、あるいはロケットの推進剤としても利用できる。月面では、高地の斜長石から抽出、精練されうるが、実際の利用は、そのような工場を月面上に作ることできるような規模に基地が発展するまで待たなくてはならないだろう。鉄は、構造材として使われうる。チタン鉄鉱(FeTiO₂)から酸素を抽出する際に鉄が副産物として生成されることから、月において意外と早い時期に利用され始めるかもしれない。

建設材料としては、コンクリートとガラスが考えられる。

月にはセメントの原料となる石灰石はないが、月の砂や岩石の中にはシリカ、アルミナなどセメントを構成する物質が含まれている。したがって、たとえば高地の酸化カルシウムを多く含む斜長石からセメントを作ることは可能である。また、月面の岩石などはもちろん骨材として利用できるだろう。唯一の問題が水であるが、上述したような方法で十分な水素が得られない場合は地球から輸送した水素を用いて豊富にある酸素と結合して水を作る以外にない。その際には、水を極力使わないコンクリート生成法が選択されるだろう。

月では、ガラスもひとつの大きな建設材料として使われるだろう。グラスファイバーやガラス複合体のような形で利用され得る。

3. 火星基地の物質・エネルギー的側面

3.1 火星とは

火星は太陽系4番目の惑星であり、昔から赤く見えたことから戦いの星として恐れられていた。また、その模様が運河のように見えたことから生命が存在するのではないかと噂されていた。今世紀の半ばになって米国およびソ連が無人探査機を送ることになり火星の姿が明らかになってきた。とりわけ1976年に送られたパイキング1, 2号は火星上の平原に着地し、その映像を送ってきた。この探査機の目的のひとつは生命の存在を訪ねることであったが、着陸地点は砂漠のようであり、生命の痕跡は認められなかった。ただし、現在でも生命あるいはその痕跡が火星上のどこかに見いだされるだろうと予測する科学者は多い。

火星は多くの点で地球との共通点を持つ。火星の1日の長さは24時間39分であるし、地軸の傾きは25度(地球は23.5度)であるため四季がある。ただし、1年の長さは地球の1.88倍である。半径は地球の約半分であり、全表面積は地球の陸地面積とほぼ等しい。地球と火星の距離は、最長で4億キロ、最短で6千万キロであり、現在の推進技術では往復に約3年かかる。地表には希薄ながら大気があり、地表での温度は平均してマイナス60℃であり、真冬のシベリアより少し寒いくらいである。最高気温は15℃、最低気温はマイナス100℃に達する。表面での重力は地球の38%である。

3.2 火星基地 マース・ハビテーション2057構想

アポロ月着陸20周年の1989年7月、米国のブッシュ大統領は今後の宇宙開発の展望を述べ、月面基地を経て火星に人を送ることを宣言した。この筋骨きによれ

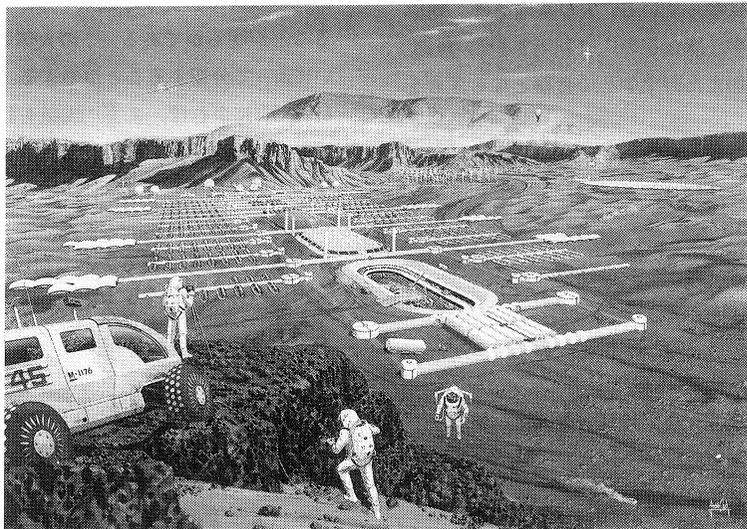


図-3 火星基地の概観

ば2020年までには火星に人が着陸する予定である。火星へは距離があること、そのため輸送のコストがかかること、エネルギーの消費がもっとも少なく火星までいける時期が約2年おきにやってくること、などから火星基地の建設が順調にいった場合でもその建設のペースはかなりゆっくりしたものにならざるをえない。したがって、われわれは2050年頃に150人規模の火星基地ができると想定した。

図-3に火星基地の外観を示す。

火星基地を構成する要素としては、

- (1) 居住施設
- (2) 植物栽培用温室
- (3) 研究施設
- (4) 資源抽出、水循環施設
- (5) エネルギー供給施設
- (6) 火星車、グライダー、ロケット発着場

が挙げられる。

居住施設は、中核となる施設であり、居住者の安全を旨とした設計がなされなければならない。火星表面での真空環境や放射線環境に対する完全な防御が必要となる。

植物栽培用温室は、食料を供給すると同時に二酸化炭素を酸素に変換する施設として生命維持装置の一環に組み込まれている。少なくとも150人の食料をまかなうためには15,000㎡の栽培面積が必要であり、危険時に対応できるよう小規模の温室を多数持っていたほうが良い。おのおのの温室では、穀類、野菜、果物、藻類のいずれかが栽培され、全体として栄養のバランスが図られるようになっている。火星基地では、効率の点からいって、牛、豚などの肉は利用できず、魚肉、鶏卵、山羊乳等を加えた野菜中心の食事とならざるを得ない。

資源、エネルギー施設については後節で触れる。

火星基地での主な活動は、

- (1) 科学探査
地質、気象、資源、生命探査
- (2) 工学実験
資源供給、エネルギー供給、農業
- (3) 通信、移動、輸送
他基地、周回衛星、地球との間で
- (4) 健康維持、医療
居住者の健康維持

である。

表3 火星大気成分¹⁾

Gas	Proportion	
Carbon dioxide (CO ₂)	95.32%	
Nitrogen (N ₂)	2.7 %	
Argon (Ar)	1.6 %	
Oxygen (O ₂)	0.13%	
Carbon monoxide (CO)	0.07%	
Water vapor (H ₂ O)	0.03%	
Neon (Ne)	2.5 ppm	
Krypton (Kr)	0.3 ppm	
Xenon (Xe)	0.08ppm	
Ozone (O ₃)	0.03ppm	
Isotope Ratios		
Ratio	Earth	Mars
¹² C/ ¹³ C	89	90
¹⁶ O/ ¹⁸ O	499	500
¹⁴ N/ ¹⁵ N	277	165
⁴⁰ Ar/ ³⁶ Ar	292	3000
¹²⁹ Xe/ ¹³² Xe	0.97	2.5

3.2 火星の物質資源

火星は、豊富な物質資源を持ち、特に人間の居住に必要な資源には事欠かない。火星の資源は、大気、水、表層物質の3つに分かれる。

火星大気の圧力は表面上で約百分の一気圧であり、地球と比べるとかなり希薄といえる。火星大気の成分とその比率を表3に示す。

火星大気の大部分は二酸化炭素であるが、窒素、酸素、水蒸気なども少しづつ含んでいる。人間の生存や植物の成育に必要な呼吸気や水が大気だけから得られることが明らかである。この大気を集め、凝固点の違いによって分留することができる。Meyer & McKay (1984)⁴⁾によれば、まず、大気を除湿し水分を得る。続いて乾燥気から二酸化炭素を分離する。残った空気中の主要な成分は窒素とアルゴンであるが、最終的にこれらを分離する。

大気から資源を得ることの利点は、採取地点において資源が枯渇することなく次から次へと補給されることである。ただし、欠点としてエネルギー効率が余り良くなく、とりわけ水分をある程度の量利用するためには、膨大な量の大气を加工する必要がある。

水分は、大気以外からも得ることが可能であるといわれる。火星では数十億年前には水が豊富で海が存在していたとも推測されているが、その後干上がり、水は氷の形で地下の凍土中に蓄えられているらしい。ま

た、火星の白く見える極冠は、二酸化炭素と水の凍ったものでできている。もうひとつの水の源は火星の表層物質中に含まれる水分である。バイキング無人探査機による実験によれば、重量で1%ほどの水分が表土に含まれている。

同じくバイキング探査機のX線蛍光実験で分析された火星表土の元素組成比を表4に示す。

表4 火星表土の元素組成比³⁾

	<i>Chryse Fines</i>	<i>Chryse Duricrust (1)</i>	<i>Chryse Duricrust (2)</i>	<i>Utopia Fines</i>
SiO ₂ , wt%	44.7	44.5	43.9	42.8
Al ₂ O ₃ , wt%	5.7	n.y.a.	5.5	n.y.a.
Fe ₂ O ₃ , wt%	18.2	18.0	18.7	20.3
MgO, wt%	8.3	n.y.a.	8.6	n.y.a.
CaO, wt%	5.6	5.3	5.6	5.0
K ₂ O, wt%	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3
TiO ₂ , wt%	0.9	0.9	0.9	1.0
SO ₃ , wt%	7.7	9.5	9.5	6.5
Cl, wt%	0.7	0.8	0.9	0.6
Sum	91.8	n.y.a.	93.6	n.y.a.
Rb, ppm	≤30			≤30
Sr, ppm	60±30			100±40
Y, ppm	70±30			50±30
Zr, ppm	≤30			30±20

この組成比から、火星には地球と同様に珪酸塩鉱物が多く存在することが推測できる。この分析法ではリンはイオウと珪素の信号に隠されて測定できずこの表には掲載されていないが、リンも存在すると推測されている。これによって、生命にとって必須な元素(H, C, N, O, S, P)はすべて火星上に存在することになる。

この元素組成比から推測される鉱物組成を表5に示す。

表5 火星表土の鉱物組成³⁾

粘土鉱物	重量パーセント
Nontronite (Fe ₂ Al _{0.5} Si _{3.5} O ₁₀ (OH) ₂ Ca _{0.25})	47
Montmorillonite (Mg _{0.3} Al _{1.7} Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ Ca _{0.15})	17
Saponite (Mg ₃ Al _{0.5} Si _{3.5} O ₁₀ (OH) ₂ Ca _{0.25})	15
Kieserite (MgSO ₄ ·H ₂ O)	13
Calcite (CaCO ₃)	7
Rutile (TiO ₂)	1

これによれば、スメクタイト型の粘土鉱物であるモンモリロナイトやノントロナイトが火星表土の主成分であることが分かった。さらに、火星から飛来したと

見られる隕石の分析から玄武岩質の火山岩が存在することも推測される。火星では水分が存在することから岩石は物理的風化ばかりではなく化学的風化も受ける。すなわち、岩石内のイオンが変換されて粘土鉱物が生成する。玄武岩質の岩石からスメクタイト型の粘土鉱物が生み出されるわけである。ちなみに、月では水が存在しないので化学的風化は起こらず、表土は熱的作用によって破壊されるという物理的風化しか受けない。

表土の利用法は、建設材料、植物栽培の培土、資源抽出の原料である。建設材料としては、ただ単に居住地に表土をかぶせ、降り注ぐ有害な宇宙船を遮蔽することが考えられる。火星の希薄な大気が宇宙線を人体に安全なレベルまで減衰するという報告⁵⁾もあるが、太陽フレアが起こった場合に備え遮蔽しておくのが無難である。粘土鉱物が存在することをうまく利用して建設用のブロックを作ることも考えられている。Clarkら⁶⁾は粘土鉱物に水を混ぜ、これに高い圧力をかけることによりブロックを作成している。これは、粘土を結合剤として用いるものであり、熱を加えない方法なので日本ではコールドプレスと呼ばれている。また、粘土鉱物は植物栽培の際の土壌を作るのに役立つ。将来的には、鉄やアルミなども表土から抽出されよう。

3.3 火星のエネルギー資源

火星では、地球で普段利用されているエネルギー資源のほとんどが存在していない⁷⁾。流水のない火星では水力発電は利用できないし、石炭や石油などの化石燃料は存在しないようである。地熱も地球よりは小さいようであり、またプレートテクトニクスがないことから局所的な地熱源もないようである。したがって、火星で利用できる自然エネルギーとしては、太陽光エネルギーと風力エネルギーしかない。

火星上で利用できる太陽光エネルギー密度は、地球上のそれに比べ小さい。太陽から火星までの距離は、地球までの距離の1.52倍であり、したがって、エネルギー密度で地球の43%程度である。ただし、これは軌道上での話であり、地表上どうして比べれば、雲の多い地球表面上に対し、曇ることの少ない火星上では、約半分以上の日射量となる。

火星上で太陽光を利用する上で問題になるのは、約2年(火星での1年)おきに起きる砂嵐である。南半球のある箇所が発生し全火星表面上に広がる過程で、100m/secの風に乗って砂塵が舞い上がるといわれる。地表に太陽電池を並べた場合には、その表面の被害は避けられないかもしれない。また、砂嵐によって

太陽光が遮蔽されてしまうのではないかという懸念もあるが、その点は、光がただ散乱されるだけなので光量としてはそれほど減衰を受けないという報告がある⁷⁾。

21世紀に火星に居住地が作られる段階では、おそらく小型の太陽発電衛星によって太陽光エネルギーが居住地に供給されることになる。さいわい、火星の静止軌道は天然の衛星のひとつであるダイモスのすぐ内側にありその資源が太陽発電衛星の材料として使われることになる。試算によれば、150人が住む火星居住地に必要な電力として、居住、研究用に2 MW、農業用に1 MW、資源加工用に4 MW、合計で7 MW必要である。多めに見積もって10MW必要であるとしてどのくらいの太陽発電衛星が必要になるだろうか。太陽発電衛星の発電の効率を20%、マイクロ波による伝達の効率を70%とすると、火星軌道上で0.6kW/m²の太陽光エネルギーを利用するためには120,000 m²の面積の太陽電池を展開する必要がある。これはおよそ縦300m、横400mの大きさに相当している。

もうひとつの天然のエネルギーである風力の利用はどうか。火星では、地球よりも強い風が吹くといわれ、平均で5 m/sec、強いときで10 m/sec、さらに山腹の傾斜地では25 m/secの風速をもつ。ただし、火星大気の密度が低いので風力として取り出せるエネルギーは小さい。今、一般的な直径d=16メートルの風力発電装置を考えると、その発生電力は、

$$P = C \cdot \frac{1}{2} \rho V^3 \cdot \pi \cdot \frac{1}{4} d^2 \quad (1)$$

と書き表わせる。ここで、効率Cを0.4、風速V=25 m/sec、密度ρ=0.017 kg/m³とすると、発生する

電力は一基で10kWとなる。したがって、風力発電は火星では主要なエネルギー源とはなりえないようだ。

3.4 火星基地でのエネルギー利用と物質循環

以上、火星での物質とエネルギー資源について眺めてみた。火星での資源の特徴は生命維持のための資源がすべて現地で得られることであり、したがって、生命維持装置の設計が資源との関連で興味があることである。3.2節で述べた火星居住地でのエネルギー・物質供給システムを図-4に示す。また、ここでの生態系システム図を図-5に示す。

火星での主要なエネルギー源は、太陽発電衛星などから供給される太陽光エネルギーである。これらのエネルギーのうち半分以上は資源の抽出に使われ、残りが火星基地に供給される。資源の抽出は大別して3種類あり、大気からの二酸化炭素の抽出、地下凍土からの水抽出、水の電気分解である。水は生態系システムにも送られるが、大部分は、帰還用の燃料の水素と酸素を得るために使われる。水素と酸素はタンクに貯蔵され居住者の帰還時に使われるが、燃料電池を介して非常用のエネルギー源としても使われるだろう。こうして、二酸化炭素、水、酸素が生態系システムの漏れの補填に使われる。

生態系システムは、いわゆる閉鎖生態系生命維持装置であり、原則として物質の完全な再循環が図られているが、エアロックなどを介した気体の漏れは避けられない。それを補うために、主要な物質である水、酸素、二酸化炭素が供給されるわけである。生態系内では魚類、山羊や鶏などの小動物類、植物、藻類が人間とともに主要な要素である。もちろん、太陽光はこれ

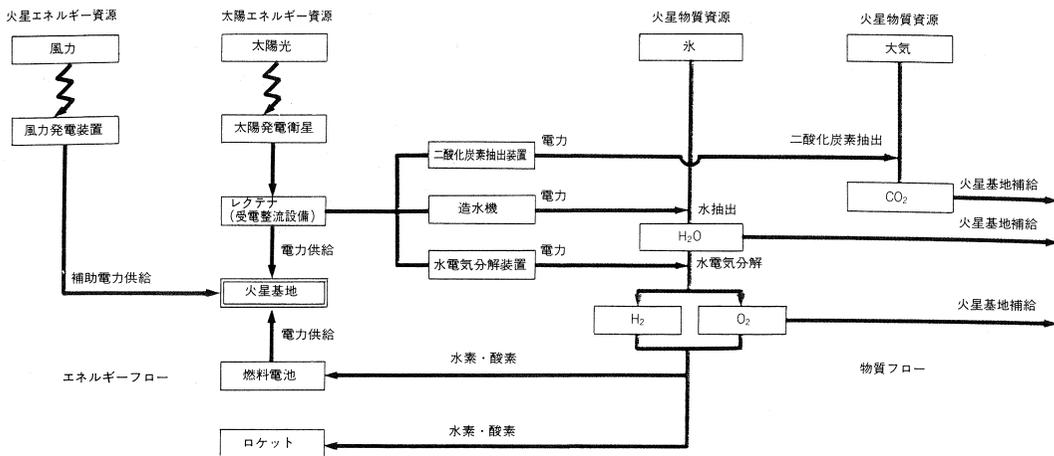


図-4 エネルギー・物質供給システム

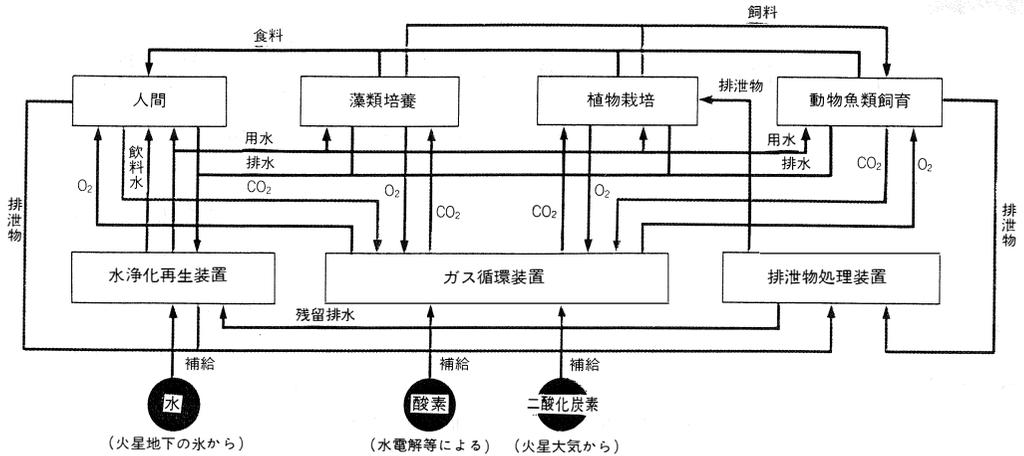


図-5 生態系システム

らの成育に存分に使われることになる。

4. あとがき

有人の月・火星計画の構想が各国で語られるようになり、月面基地や火星基地が現実のものとして視野に入ってきた。これまで宇宙産業に関わってこなかった建設会社も、月や火星に居住地を設けることになれば参入できる分野も出てくる。そのような考えで、地球外での居住の可能性を検討したのが以上に述べた月や火星の基地構想である。このような遠い地域での居住にあたっては現地で利用できる物質とエネルギーの資源が鍵となる。ここでは、資源利用と基地建設の関わりについて述べた。

参 考 文 献

1) Mendell, W. W., Lunar Bases and Space Activities of

the 21st Century (1984) Lunar Planetary Institute.
 2) Heiken, G., et al., ed., Lunar Sourcebook, (1991) Cambridge University Press.
 3) Carr, M. H., The Surface of Mars (1981) Yale University Press.
 4) Meyer, T. R., and C. P. McKay, "The Atmosphere of Mars Resources for the Exploration and Settlement of Mars", in The Case for Mars, ed. by P. J. Boston (1984).
 5) Simonsen, L. C., et al., "Ionizing Radiation Environment at the Mars Surface", Engineering, Construction, and Operations in Space II, ed. by Johnson, S. W. and Wetzel, J. P. (1990).
 6) Boyd, R. C., et al., "Duricrete and Composites Construction on Mars", in The Case of Mars, ed. by Stoker, C. (1989).
 7) Meyer, T. R. and McKay, C. P., "The Resources of Mars for Settlement", in JBIS, 42, 147-160, 1989.