物性研究　58－1(1992－4)

修士論文　（1991年度）

宇宙植民島の熱収支問題について

信州大学大学院
理学研究科　物理学専攻　　西森　一夫

（1992年3月9日受理）

目　次

§0．序論・宇宙植民島 再考 …… 9
§1．宇宙植民島 概観 …… 10
§2．植民島大気の定常状態 …… 13
§3．降水の可能性 …… 16
§4．陸部の熱収支 …… 18
§5．土壌の保温 …… 21
§6．窓部の熱収支 …… 24
§7．陽壁・陰壁の熱収支 …… 26
§8．陸部地下 大気冷却機構 …… 27
§9．大気の循環 …… 28
§10．結・宇宙植民島の存立 …… 31
註 …… 33
参考文献 …… 33

§0. 序論・宇宙植民島 再考

1974年、G.K.O'Neill は、宇宙植民島 Space Colony の構想を Physics Today誌上に発表した[1]。以来、人々の宇宙開発への関心の高さも手伝って、この O'Neillのアイディアは宇宙開発の将来をになう一翼として、宇宙開発関係者のみならず、多くの一般の人々にも知られるようになった。宇宙植民島の構造・大きさ・材料・軌道などの宇宙物理学的な議論は、今日ではほぼ出尽くされ、宇宙開発についての一般向け解説書にも、いくつか具体的な数値が記載されている。

しかし、宇宙植民島の内部の『環境』を詳しく検討した論は、皆無といってもよい。宇宙植民島について言及している書籍は数々あるが、そのほとんどが完成予定図を解説するにとどまっているのが現状である。そのような中で、生物や地球についてのエントロピー論を展開していた勝木 渥は、エントロピーを廃棄する機構が見当たらないことから、宇宙植民島の存立は不可能であると断定した[2]。宇宙植民島が存立可能であるか否かを判定するには、内部環境のアセスメントが必要であり、その点で勝木の断定は、根拠に関しての綿密な検討を欠いたものではあったが、宇宙開発推進派のエントロピー廃棄についての考察の不備をついた、痛烈な批判であった。

宇宙植民島は、永続的な人類の居住をその目的とする以上、地球に匹敵するエントロピー廃棄の能力を持っていることが必要不可欠である。もしも充分なエントロピー廃棄機構を宇宙植民島が持たないならば、完成したとしても入植はできず、今までの技術的な議論はすべて無意味となってしまう。内部環境の議論こそが、宇宙植民島を語るうえで最も重要なのである。

以下に、宇宙植民島の内部環境に主眼をおいて、熱力学的な考察をおこなう。そして宇宙植民島のエントロピー廃棄機構が、内部に再現される自然環境にとって、充分であるか否かを検討する。こうした環境科学の見地から宇宙植民島を評価しなおすことによって、内部に入植可能な環境をつくることができるのか、またそれが可能なら入植できる人間の数はどれくらいなのか、といった問題に答えることができるであろう。

§1．宇宙植民島 概観

宇宙植民島全般についての概略をまとめておく。宇宙植民島とは、まず宇宙空間に用意した密閉構造物の内部に大気を封入し、回転遠心力によって上下をつくる。そして太陽光線をそのまま内部へ適切に取り入れることによって、永続的な人類の生活圏および地球上とほぼ変わらぬ“自然環境”をも、構造物内に再現しようとするものである。したがって、地球からの物資支援によって存立している宇宙ステーション等とは根本的に異なり、宇宙植民島はすべての生活物資を、自家生産でまかなうことが可能でなければならない。

現在のところ、宇宙植民島には数種のタイプが考案されている。本論ではその中でも、最も巨大にして、居住人数が多くみつもられている『シリンダー型宇宙植民島』について検討する。その形状は円筒であり、太陽光線を内側へと導くために、傘の骨状に反射板が３枚つき出、円筒の側面には窓が設けられている。円筒部のサイズは、O'Neill論文によれば半径３km、長さ30kmとされている。その外観を図１に示す。

円筒部の中心軸は太陽光線に対して平行に構え、この軸まわりに宇宙植民島は回転する。このときの角速度は、円筒部の円周が１Ｇの遠心力を得るように設定する。円筒部の側面は、回転軸に平行に６等分され、人間の生活圏である陸部と、太陽光線を通す窓部が、交互に３つづつ配置される。円筒部の断面を、図２に示す。反射板は１つの窓部に１枚が対応し、これに反射された太陽光線は対応する窓部をくぐって、向かい側の陸部を照らす。この太陽光線が、宇宙植民島における日射になる。

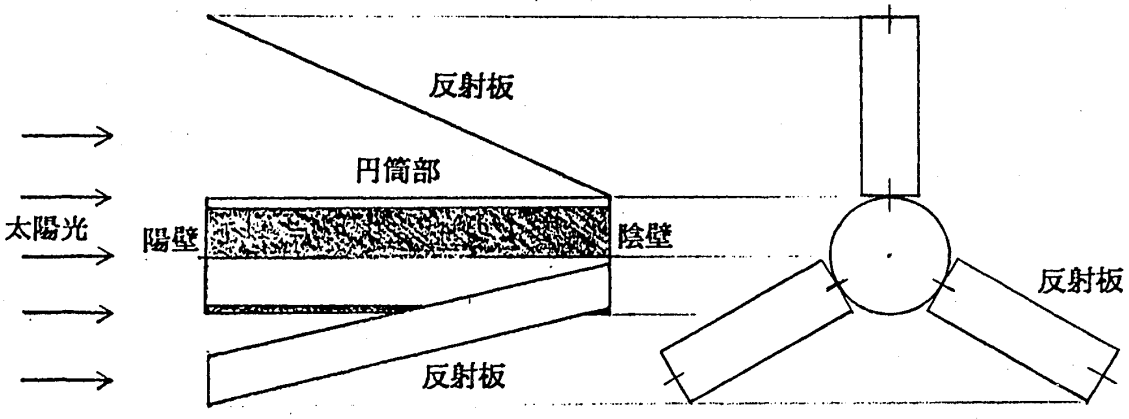

図１　宇宙植民島の外観

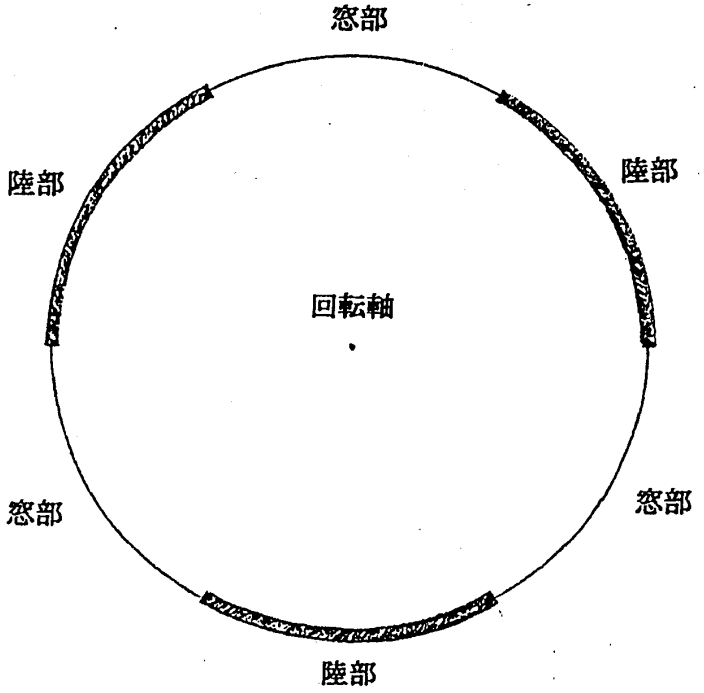

図２　円筒部の断面

以上は O'Neillが構想したシリンダー型宇宙植民島についての要約であるが、反射板については、私は次のような構造上の変更を提案したい。

従来の反射板は、一枚板状の巨大な鏡であり、必要とする日射に応じて、円筒部との角度 θ を変える仕様になっている。その様子を示したのが図３で、太陽光は斜めに陸部に到達する。この点で地球地表との類似は高いが、陸部の陽壁ぎわの一帯は、影の中に入らざるをえなくなる。さらに、一枚板状の場合、陸部に一様かつ斉一的な日射しか送ることができない。宇宙植民島を夜にするとき、反射板は窓部に蓋のようにかぶさるが、幅３km、長さ30km以上の巨大物体を動かすには大変な機構が必要となるし、θ によって宇宙植民島の回転角速度 ω が変わることも問題である。

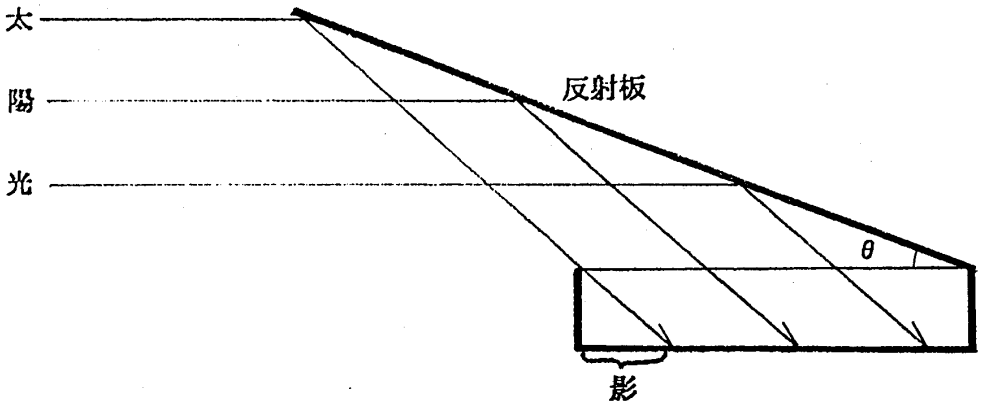

図３　一枚板状の反射板

太陽光は、宇宙植民島の物質を循環させる第一因であるから、状況に応じてただちに調整できるのが望ましい。こうした要請に応えるものとして、多枚構成の反射板が考えられる。それは図４のように、小さな鏡を幾多も並べたもので、日射の強さを働いている鏡と休んでいる鏡の数比を変えて調節する。巨大な一枚鏡の場合より、多枚構成型ははるかに容易に素早く、また必要に応じて局所的に異なる日射も提供できる。質量が小さくできるのも長所である。図１の宇宙植民島は、多枚型の反射板を採用して描いてある。この宇宙植民島においては、太陽はつねに真上に見え、ただし鏡がとびとびである分、光の強度は薄れることになる。

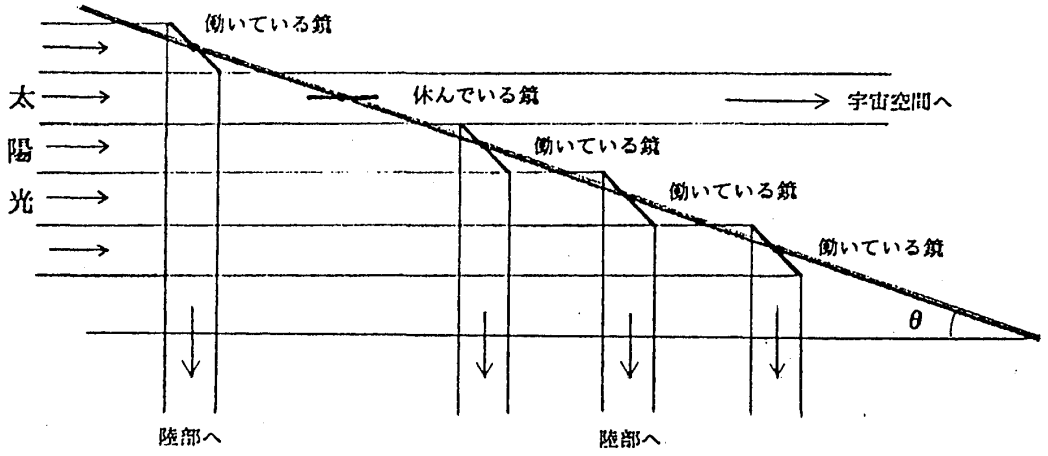

図４　多枚構成型の反射板

反射板の円筒部に対する角度θは、陸部地表において必要とする最強日射から決めなければならない。この多枚型の場合は、次のように計算される。地球上の南中高度φの日射と等しく設定するには、θは次の式をみたさなければならない。

$$0.5 \times \sin\phi = \tan\theta \qquad (1\text{-}1)$$

ここで左辺の係数0.5は、地球の大気上層に到達した太陽光のうち、約半分が地表にとどいていることによる。例えば日射の強さを、中緯度帯の春秋期の正午のそれと同じにするには、南中高度φとして50°を代入して、θ～21°を得る。ただしこれは近似的な議論である。もしも、陸部のどこでも同じ日射を得ようとするなら、陸部の丸みを考慮した反射板の反射率分布を用意しなければならない。反射板の反射率分布が一様な場合では、陸部の中央線上に比べ、窓部と隣接する陸部外辺では86.6%（＝cos 30°）に日射はおちる。しかし以後では反射率分布がそれを補うように設定されており、陸部はどこも同じ日射をうけているとして議論をすすめる。

他にも留意しておかなければならないこととして、太陽光の散乱・吸収過程がある。反射板に曲げられ、円筒部に入った光は、窓部や大気によって散乱・吸収される。陸部に達

する光は、直達光と散乱光に分類されるが、宇宙植民島内ではそれぞれがどのような周波強度分布がもたらされるのかも、今後研究されなければならない。とくに植物にとっては、葉に入射する光の周波強度分布が、光合成活動を充分に支えられるかどうかが問題になってくる。もし半径3㎞の宇宙植民島の大気が、そのままでは宇宙植民島の生命活動にとって不利ならば、なんらかの工夫が必要とされる。

§2. 植民島大気の定常状態

前節で宇宙植民島のおおまかな構造を見てきたが、次に円筒部に封入された大気の検討する。円筒部は大きく分けて４つの部分、陸部，窓部，陽壁，陰壁からなっており、これらに植民島大気は囲まれている。

大気は、単なる気体とは異なり、常に対流を生じて、地上から放出される熱を回収し、低温熱源に運びつづける性質をもっている。地上から熱を受けて温度を上げた気団は、浮力によって上昇し、気圧低下による断熱冷却のために温度を降下させる。そのために、大気には高度が増すにつれて気温が降下する現象があらわれる。基本的な気圧、気温、密度の高度分布を求めるために、まず器との熱交換を無視した、角速度ωで回転する円筒型大気の定常状態を考える。大気の定常状態とは、対流によって大気全体がよく攪拌されており、上昇して断熱冷却を受けた気団の温度が、その高度における大気の気温と等しくなっている状態をさす。したがってこの状態では、結果的に気団間での熱伝導は生じず、大気１モルあたりのエントロピーＳの変化量ｄＳは、常に０である。

単位長さの厚みをもつ円柱型大気の輪切りを考え、大気とともに回転する座標系（ｒ，φ）を図５のように設ける。原点Ｏは回転軸上にある。

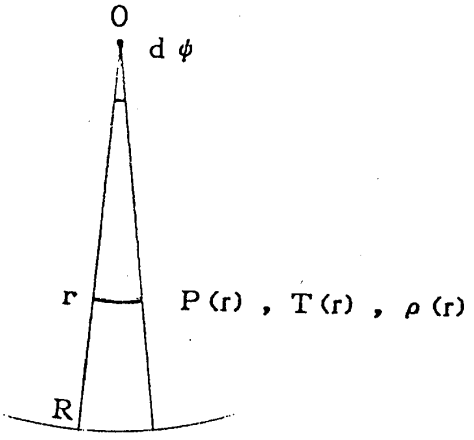

図５　座標系（ｒ，φ）

気圧，気温，密度は軸対称だから、それぞれP(r), T(r), ρ(r) とする。Pはρをもちいて次のように書ける。

$$dP(r) = r\omega^2 \cdot \rho(r) \cdot dr \qquad (2\text{-}1)$$

一方、モルあたりのエントロピーSを、T，Pの関数とすると、

$$dS = \left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_P dT + \left(\frac{\partial S}{\partial P}\right)_T dP \quad . \qquad (2\text{-}2)$$

第1項の偏微分は、定圧モル比熱C_Pをもちいて書き換えることができる：

$$\left(\frac{\delta S}{\delta T}\right)_P = \frac{1}{T}\left(\frac{\delta Q}{\delta T}\right)_P = \frac{C_P}{T}$$

$$\therefore \left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_P = \frac{C_P}{T} \quad . \qquad (2\text{-}3)$$

また、第2項を、マクスウェルの関係式と気体の状態方程式をつかって書き換える：

$$\left(\frac{\partial S}{\partial P}\right)_T = -\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P = -\frac{R}{P} \quad . \qquad (2\text{-}4)$$

これら2式を、(2-2)に代入する。さらに定常状態の仮定より、dS＝0とすれば、

$$dS = \frac{C_P}{T} dT - \frac{R}{P} dP = 0$$

$$\therefore \frac{dT}{dP} = \frac{RT}{PC_P} \quad . \qquad (2\text{-}5)$$

座標rと気温T(r) との関係は、(2-1)および(2-5)から求められる：

$$\frac{dT}{dr} = \frac{dT}{dP}\frac{dP}{dr} = \frac{RT}{PC_P} \cdot r\omega^2 \cdot \rho(r) \quad . \qquad (2\text{-}6)$$

また、P(r)とρ(r)の関係は、理想気体の状態方程式から、気体分子量をMとして、

$$\rho(r) = \frac{M}{RT} P(r) \qquad (2\text{-}7)$$

であるから、これを(2-6)に代入し、積分することによってT(r)の式を得る：

$$\frac{dT}{dr} = \frac{RT}{PC_P} \cdot r\omega^2 \cdot \frac{MP}{RT} = \frac{M\omega^2}{C_P} r$$

$$\therefore T(r) = \frac{M\omega^2}{2C_P} r^2 + T_0 \quad . \qquad (2\text{-}8)$$

ここで積分定数T_0は、回転軸上の気温になる。陸部地表での気温を、中緯度帯の春秋期の平均気温17℃、絶対温度290Kとして、気圧の高度分布を試算してみる。以後、数値計算はMKS単位系でおこなう。宇宙植民島の半径は O'Neill論文より3kmとすると、$\omega^2 = 9.8/3000$。大気の分子量$M = 2.9 \cdot 10^{-2}$kg、大気の定圧比熱$C_P = 29.15$ J/mol·K をそれぞれ(2-8)に代入すると、

$$T(r) = (1.623 \cdot 10^{-6}) r^2 + 275.4 \qquad (2\text{-}9)$$

となる。この場合、回転軸上での気温は275.4Kとなり、地表と回転軸上との温度差は、14.6Kになる。つまり、回転軸上を0℃にするには、地表気温を14.6℃にしなければなら

ない。地表気温を17℃としているこの場合では、最も冷えている回転軸上ですら氷点下にはならないから、何らかの著しく気温を下げる効果があらわれないかぎり、雪やあられの類は降らないと考えられる。

次に、気圧P(r)を求める。(2-7)を(2-1)に代入すると、

$$dP = r\omega^2 \cdot \frac{M}{RT} \cdot P(r) \cdot dr \quad . \qquad (2\text{-}10)$$

T(r)はすでに(2-8)によって分かっているから、これも代入して積分すれば、

$$\frac{1}{P} dP = \frac{M\omega^2}{R} \frac{r}{\frac{M\omega^2}{2C_p} r^2 + T_0} dr$$

$$\log(P) = \frac{C_p}{R} \cdot \log\left(\frac{M\omega^2}{2C_p} r^2 + T_0\right) + \text{Constant}$$

$$\therefore \quad P(r) = P_0 \left(\frac{M\omega^2}{2C_p} r^2 + T_0\right)^{C_p/R} \qquad (2\text{-}11)$$

となる。地上での気圧を1atm (=1.013·10^{5}Pa)として、(2-11)の数値計算をおこなうと、

$$P(r) = (2.416 \cdot 10^{-4}) \cdot \left((1.623 \cdot 10^{-6}) r^2 + 275.4\right)^{3.506} \qquad (2\text{-}12)$$

を得て、回転軸上の気圧は 0.834atm と計算される。こうして求められた回転軸上の気温・気圧は、それぞれ地球上の標高2000mと1500mでの値にほぼ相当する。

§3．降水の可能性

前節の結果にもとづいて、宇宙植民島における降水の可能性について検討しよう。

一般に降水は次のような機構によって生じる。水蒸気を含んだ空気が上昇する際、気圧の低下によって空気は断熱冷却をこうむる。やがて露点温度以下にまで気温が下がると、水蒸気は空気中の微塵などを核として凝結する。この集団が雲であり、凝結水がさらに成長して落下をはじめたものが雨滴になる。大気上昇の原因としては、空気が暖められて自発的に上昇気流を形成したり、地形や寒冷気団との衝突によって強制的に押し上げられることが挙げられる。水蒸気が凝結すると、潜熱を放出してまわりの空気を暖めるが、その熱は最終的には放射によって宇宙へと捨てられる。かくして地球大気は、絶えざる潜熱解放にも加熱することなく、ほぼ一定の温度を保ち、また新たなる雲が発生する舞台となる。つまり、水による上空への熱量輸送と、宇宙への熱放射の均衡が、地球大気の状況を決定している。

したがって、宇宙植民島の定常大気の圧力・温度分布が分かっても、一概には降水の可能性を論ずることはできない。植民島の大気に、地球とほぼ同じような定常的な熱放散の能力、つまりエントロピー廃棄の能力が備わっているか否かが、降水現象の有無を分っている。これについての検討は後にゆずり、ここでは大気が定常状態にあるとした前節の手続きをふんで、簡単な目安としての考察をすすめる。

大気の対流運動にともなう状態変化を調べるために、次のような思考実験をしてみる。いま、1atm，17℃の円筒部地表にあった空気１m^3を、『断熱シリンダー』に封じこめる。このシリンダーは、外部と熱交換は行わないが、ピストンは外気圧に応じて自在に動くようになっており、常にピストン内外の気圧がつり合う位置にとまるようになっている。上空へこのシリンダーを持ち上げていくことによって、対流にのった地表の空気が、どのような変化をするのかを見ていく。

空気を理想気体とみなすと、断熱過程の Poissonの式（PV^{γ}＝一定）をつかうことができる。室温では空気の比熱比γは1.40。シリンダーに捕らえた空気の湿度を70％として、この空気が飽和湿度に達する位置ｒを求めてみる。17℃における湿度70％の水蒸気圧は、0.01338atmであり、これを飽和水蒸気圧とする温度は、11.5℃である。まずシリンダー内の空気が、この温度になる気圧Ｐを求め、(2-12)からｒを逆算する。

Poissonの式を、気体の状態方程式をもちいて変形すると、

$$\frac{T}{P^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} = 一定 \qquad (3\text{-}1)$$

この式をつかって、11.5℃に対応する気圧Ｐの値は、

$$\frac{290}{1^{\frac{0.4}{1.4}}} = \frac{284.5}{P^{\frac{0.4}{1.4}}} \qquad (3\text{-}2)$$

$$\therefore \quad P = 0.935 \text{ atm}$$

となる。この気圧Pの位置rは、(2-12)より、

$$r = 2370\text{m}$$

つまり、地上 630mで飽和する。これよりさらに上空へシリンダーを持ち上げれば、雲が発生する。後の§9で述べるように、地上 600mをこえて上昇していく対流は、非常に動きが緩慢なものであるが、さらに回転軸にまでシリンダーを持ち上げてみる。

回転軸上の気温は 275.4Kであった。このときの飽和水蒸気圧は0.007167atになり、これと地表にてシリンダーに閉じこめた蒸気圧との差 0.00621atm の分が水として凝結する。(2-7) から密度を求めると、シリンダーに捕らえた空気1m^3あたりに約5g、ただし回転軸上では体積が大きくなっていて、正しくは1.14m^3あたりに5gの水を持つことになる。水の潜熱は温度とともに変化するが、2490J/gとみなせば、これを5倍して 12450J。これは等圧過程でシリンダー内の空気の温度を約10℃上げることができる熱量である。

潜熱解放によるピストン内の空気の温度上昇を無視した、大変大雑把なあつかいをしたが、送気装置などで地上の空気を 630m以上に運べば雲が出現し、さらに高く運べば雨を降らせる。ただし、この強制対流の規模が大きく、日常的に行われるならば、水の潜熱解放が続き、上空の気温は高くなる。もしも宇宙植民島の大気が充分なエントロピー廃棄の能力を持たないならば、次第に雲はできにくくなり、降水はのぞめない。上空にこもった熱は、伝導によってゆっくりと地上付近にまでひろがり、宇宙植民島の大気全体が温暖化する。

さらに、宇宙植民島の大気の狭さについても考慮しておかなければならない。地球上の気候変化にたずさわる大気の厚さは、およそ15km。地表に対して同じ広さが対応している。一方、宇宙植民島の大気は、実質的には厚さ2km、昇るにつれて狭まる「共有された空」なのである。地球と同様、放射によって排熱するならば、地球大気を上回る素早さが必要とされる。もしこの機能が不十分ならば、陸部からの熱を引きうける低温熱源の空としての役割を果たすことができない。

この問題は、宇宙植民島が入植可能か否かを決する重要なものである。これまでは大気のおおまかな構造を知るために、定常状態を考えてきたが、以降は大気の熱収支に一つ一つ着目し、はたして陸部から立ちのぼる熱を、大気が処理できるかを検討していく。

§4．陸部の熱収支

陸部は、入植者の生活圏であり、それと共に自然がのせられる舞台となる部分である。土壌が盛られ、農地や林地がつくられ、家畜なども放たれる。宇宙植民島の“自然”は、現代の都市に見られるような単なる景観用ではなく、宇宙植民島の自家生産をになう能力を持っていなければならない。したがって陸部の景観は、地球上において見られるような林農地とほとんど変わらないだろう。

人間の生存に必要な物質だけを工業的に循環再生産して、“自然”に一切依存せずに生活していく宇宙植民島も、技術次第では存立可能かもしれないが、それは O'Neillによって提唱された宇宙植民島とは、形態的・性質的に著しく異なる。よって、本論では以後、自然環境の物質循環をいかした宇宙植民島に考察を限定する。

本節では、とりあえず陸部上の林農地が放つ水蒸気や熱を、植民島の大気が回収し、処理することができると仮定する。この仮定が成り立たなければ、宇宙植民島は自家生産できず、そもそもの宇宙植民島の定義から外れることになる。大気が受けとった水蒸気や熱を、どのようにして処理するかは、後に検討する。

初めに、陸部のおおまかな熱収支からみていく。地球上の林農地と変わらぬ環境を再現するからには、陸部を照らす日射の雛形として、地球における太陽光の熱分配を参考とするのは妥当であろう。地球大気圏外に到達する太陽光のエネルギーを100として、その経路と寄留先を、表１に示す[3]。

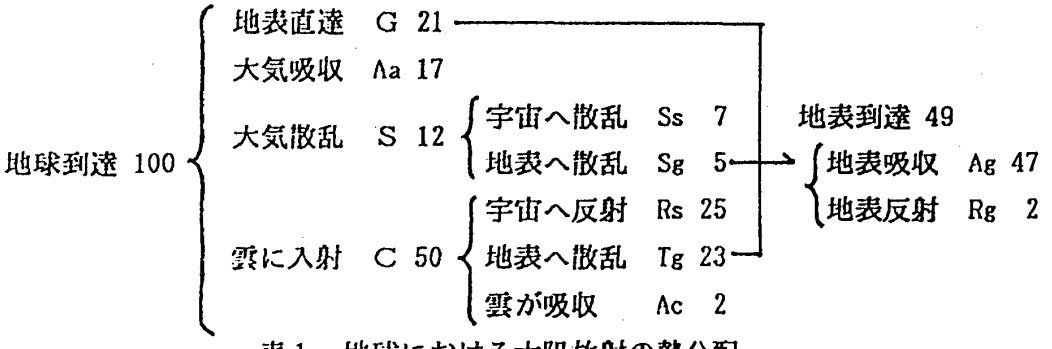

表１　地球における太陽放射の熱分配

ここで地表に到達する太陽光に注目すると、49(=G+Sg+Tg)がいったん地表にまでやってくるが、そのうちRgの２は反射されて宇宙へと向かう。これは地球の地表全体（海や様々な地面状態の総合）の反射率が４％であるためで、例えば、森林：３～10％，畑地：３～15％，稲田：18％[4]と反射率は地面状態によって変化して、宇宙植民島の場合ではRgはもっと上昇する。試算として陸部地表の反射率を10％とすれば、Rgは５となる，49から５を

減じた44が、植民島の陸部地表で吸収されて熱になる。

地表に到達した光の構成をみると、直達Gが21と最も多いが、大気による散乱光Sg、雲の透過光Tgをたすと28となって、直達を上回る。宇宙植民島の場合はどうであろうか。地球の空とは大きさも構造もまったく異なる植民島の大気が、陸部地表にどのような光の状況をもたらすかについては、今後精密に研究されてもよいことは、§1でも述べた。空を横断する他の2つの陸部からの反射光や、円柱型大気の散乱・吸収についてのシュミレーションが必要だろう。その結果、陸部を照らす太陽光が生命活動にとり適切ではないならば、窓部に工夫をほどこしたり、植民島の半径を変更しなければならない。

さて宇宙植民島において、地球とほぼ同じ直達・散乱の光の比率が得られるようになったと仮定して、陸部が太陽光から得た熱Ag＝44を、どのように処理しているかを見よう。再び地球全体の例から推察する[5]。

地表の獲得した熱　Ag 47 ➡
- 水の気化による熱処理　Hv 23
- 上空への放射による熱処理　Hr 14
- 大気への伝導による熱処理　Hc 10

表2　地球地表の熱処理配分

表2の数値は、地球地表全体の平均であることを注意しておく。つまり地球上のすべての地表が、定常的に表2のような配分で熱処理をおこなっているわけではなく、その地表部分の固有の風土によって決まる、それぞれの熱処理配分がある。それらを地球全体にわたって総合平均したのが、表2になるわけである。さらに、表2に現れない項「地中貯蓄熱量Hg」が存在することも指摘しておく。地中貯蓄熱量Hgとは、日中に地熱（海水熱）として蓄えられる熱量であり、夜にはその分が気化，伝導，放射として大気へ放出されてしまうので、一日で平均すれば0となる。この地中貯蓄熱量Hgについては、大気への伝導による熱量処理Hcとともに、次節で検討する。

まず宇宙植民島の「気化熱による熱処理Hv」から検討しよう。もし当初の仮定より、宇宙植民島の陸部（林農地）とそれに接している大気が、地球の林農地に類似した物質状況，熱収支関係にあるならば、宇宙植民島においてもHvは、地球林農地の値にほぼ近いと考えてよいだろう。

ただし宇宙植民島のHvとしては、地球上の林農地のHvの値を適用すべきで、表2の値をそのまま転用するわけにはいかない。正しい値は林農地の生態調査によって求められなければならない。

宇宙植民島における「放射による熱処理Hr」については、特別の考察が必要である。地

球地表は、大気へ一方的に放射しているわけではない。地表が大気へ放つ放射は、Stefan-Boltzmannの法則にしたがった赤外域の黒体放射とみなしてもよいが、一方、大気中の水蒸気や二酸化炭素も、特定の波長域の放射を宇宙と地表に向かって放っている。前者と後者のさしひきが、上向き放射Hr＝14として計上されているのである。宇宙植民島の大気は地球大気にくらべて大変狭いので、大気が地表に放つ放射は、地球のそれよりも小さくなると考えられる。その代わりに、宇宙植民島では他の２つの陸部，３つの窓部，陽壁，陰壁からの放射が支配的になる。窓部，陽壁，陰壁は、陸部よりも低温だろうから、そこからくる放射のエネルギー密度は陸部からのそれよりは低く、結果として上向き放射Hrが観測されるはずである。

植民島大気の放射を無視して、Hrを簡単に見積ってみよう。窓部との境界線近くの、陽壁・陰壁からの距離が等しくなる地点における放射の出入りを考える。この地点からは、陸部と窓部が対称に並ぶ視界が得られる。いま陽壁・陰壁を無視すれば、天球の立体角２πが、陸部と窓部によって１対１に占められることになる。いま陸部と窓部の温度が、それぞれ一様にT_L, T_W であるとする。足元の陸部地表からは、Stefan-Boltzmannの法則によって、

$$\sigma T_L^4 \tag{4-1}$$

の放射が空に向かう。逆に空からは、

$$\frac{\sigma T_L^4 + \sigma T_W^4}{2} \tag{4-2}$$

だけの放射がさしこむ。前者から後者を引けば、上向き放射Hrとして、

$$Hr = \frac{\sigma T_L^4 - \sigma T_W^4}{2} \tag{4-3}$$

が観測されることになる。

T_L を 290K、T_W を 275Kとすると、上向き放射Hrは、

$$Hr = 38.4 \ J/m^2 \cdot sec$$

となる。これは、地球全体におけるHr:192W/m²の約５分の１である。また(4-1)より、地球と同じHrを得るためには、窓部の温度Tを 132Kまで下げなければならないことも分かる。また、ちなみに陽壁・陰壁の温度がほぼ一様に 283K（～気温）ならば、これらを無視しなくても、宇宙植民島のHrは、どこでもほぼ同じ値をとる。

Hrの値やその周波分布は、厳密には位置によって（他の陸部や窓部などの温度と立体角分布によって）違い、陸部地表に入射する光の状態と同様、詳しくは今後の研究を待つことになる。とりあえず本論では、宇宙植民島の上向き放射は地球の５分の１程度とみて、以後はHr＝３とみなす。

さらに、宇宙植民島の「大気への伝導による熱処理Hc」についても、特別の考察が必要である。なぜならば、陸部地表から熱伝導によって流失する熱はHcだけではなく、陸部の

下方へ伝導し、宇宙へと放射される「貫通熱量Ht」が存在するからである。さらに、土壌に蓄えられる熱量（地中貯蓄熱量Hg）も、一日周期の熱収支の変動を考慮する上で欠くことはできない。これらHc，Ht，Hgについては、次節で土壌保全の立場から一緒にあつかうことにする。

§5．土壌の保温

陸部の上層には、地表状況に応じて盛られた土壌がある。土壌の深さは一律である必要はなく、林地では樹木が根をのばせるように深く、耕地では作物によるが数mでよいだろう。しかし、土壌は均一的に適切な厚みにしておくのが、土地の汎用性を高めるためにもよいであろう。一般的な樹木は、高さが15m前後にまで成長するが、根の深さは樹高の１割～２割程度[6]にすぎないので、土壌の厚さは５ｍもとれば充分だろう。陸部の断面を模式的に描いたのが図６である。

地球では地下に掘削していくと土壌の温度は上昇するが、宇宙植民島では陸部の底が宇宙に絶えず熱放射しているので、地下に潜っていくと温度は降下する。本節では土壌の温度分布について調べ、地表に林農地を築くのに支障がないかを検討する。

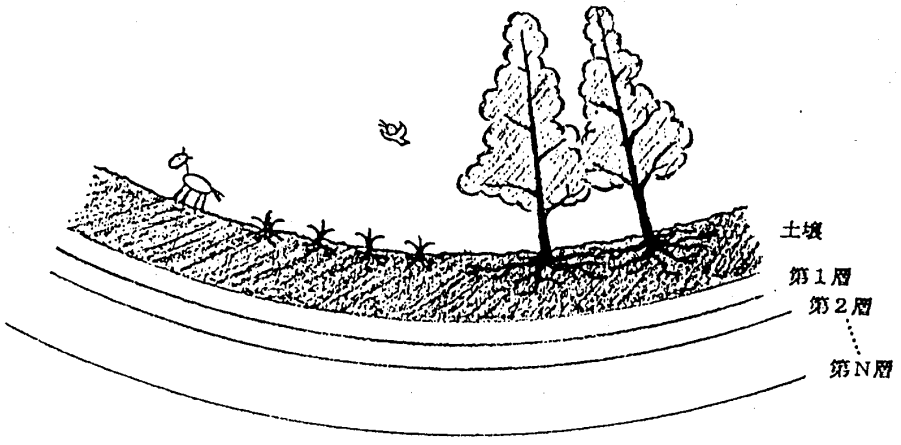

図６　陸部 断面

土壌の厚さを５ｍとし、最下部が宇宙にむきだしになっており、黒体放射をしている場合を考えよう。土壌の熱伝導度は、土壌の状態や温度によって変化するが、0.14J/s·m·K一定であるとみなす。地表が 290Kに保たれ、土壌の温度分布が定常状態となっているときの、陸部を垂直に降下する貫通熱流Htを求める。最下部の温度をＴとすれば、Stefan-

Boltzmannの法則と Fourierの熱伝導式から、最下部の熱収支として次の等式が成り立つ。この式からTが求められる。

$$\sigma T^4 = 0.14\,\frac{290 - T}{5} \qquad (5\text{-}1)$$

$$\therefore\ T = 98.6\ \mathrm{K}$$

最下部は約100Kとなり、土壌の地下45cmより下は、0℃以下で永久凍土となる。このときの貫通熱量Htは、

$$\sigma\,(98.6)^4 = 5.36\ \mathrm{J/m^2\cdot sec}$$

となる。太陽定数$1.37\cdot10^3$J/m²·secより、南中高度50°のときの地球地表1m²あたりが、太陽から1秒間に得る熱量を計算してみると 493J/m²·secで、それに対して上記のHtの値は非常に小さい。しかしこの場合では45cm以下は永久凍土になってしまい、林農地としては問題がある。そこで保温材で土壌の底をおおって、過冷から守らなければならない。宇宙植民島の構造上、土壌の下には陸部本体があるから、ある一定の保温効果が得られるだろうが、強度面だけでなく、土壌の熱代謝についても、陸部本体は積極的な役割を果たさなければならないのである。

図6のように、陸部本体を何層もの魔法瓶状の保温膜とみなして、土壌保温に必要になる層の数を計算する。各層は黒体で、隣接する層からの放射をすべて吸収する。土壌最下部，第1層，第2層，……，第N層の各温度を$T_G, T_1, T_2, \cdots\cdots, T_N$とすれば、次のような一連の式から温度を計算できる。各式の右辺は各層が受ける熱を、左辺は放射する熱を示す。なお、Lは土壌の厚さ、Kは土壌の熱伝導度である。

$$\begin{aligned}
&\text{土壌下部} : && \sigma T_G^4 = K\,\frac{290 - T_G}{L} + \sigma T_1^4 \\
&\text{第 1 層} : && 2\sigma T_1^4 = \sigma T_G^4 + \sigma T_2^4 \\
&\text{第 2 層} : && 2\sigma T_2^4 = \sigma T_1^4 + \sigma T_3^4 \\
&\ \vdots && \ \vdots \\
&\text{第 N 層} : && 2\sigma T_N^4 = \sigma T_{N-1}^4
\end{aligned} \qquad (5\text{-}2)$$

第N層についての式を、順次上の層の式へと代入していくと、最終的には次の2つの式へと要約される。

$$\begin{aligned}
&T_G^4 = (N+1)\,T_N^4 \\
&L\sigma T_N^4 + KT_G = 290\cdot K
\end{aligned} \qquad (5\text{-}3)$$

土壌の厚さL＝5m、熱伝導度K＝0.14のとき、T_Gを10℃とするには、上の式より保温層は1855枚が必要で、T_{loss}は43.1Kと計算される。このときの貫通熱量Htは、

$$\sigma\,(43.1)^4 = 0.195\ \mathrm{J/m^2\cdot sec}$$

となり、土壌の過冷防止のために陸部の断熱性を高めると、副産物として貫通熱量Htは、地表が得る熱量に対して無視しうるほど小さくなる。

以上の結果より、陸部を林農地として適するようにすると、土壌は内部に熱を蓄えはするが、熱を地下に流して処理することはない（貫通熱量Ht～0）のがわかる。陸部地表は地球とほぼ同様に、気化，伝導，放射によって、すべての熱処理をおこなう。ただし、放射による熱処理Hrが地球の５分の１に落ちるため、土壌の温度はやや高く、その結果として気化Hv，大気伝導Hc，地中貯蓄熱量Hgは、地球のものより若干増加すると思われる。この効果によって林農地維持がむつかしくなるようならば、土壌の加熱を防ぐために土壌底の断熱性をゆるめられるようにして、過剰な熱を廃棄できるようにする（意図的に貫通熱量Htをうみだす）必要もあるかも知れない。ただし、日中に土壌が地中貯蓄熱量Hgとして熱を温存し、温度が高くなるのは熱代謝上重要で、これがないと、日没後の宇宙植民島は寒冷化におそわれる。逆にいえば、熱を貯蓄する土壌の性質上、宇宙植民島にも夜をつくるか、貫通熱量Htによって排熱するかで、地熱を解放してやらなければならない。場合によっては、宇宙植民島に夜を設けずに、貫通熱量Htだけによって地熱を奪いつづけることもできるであろう。しかし林農地の生態にとっては、夜を設けた方が地球環境に酷似する点で有利であろう。宇宙植民島が昼間に加熱しすぎないように適切に貫通熱量Htを調整し、なおかつ夜間に冷えすぎないように適切に地中貯蓄熱量Hgを蓄えておく、巧妙な熱の操作術を、入植者は修得しなければならない。

§6．窓部の熱収支

多くの宇宙開発解説書には、宇宙植民島の建設物資の調達地として、月があげられている。月面の岩石には、SiO_2を多く含むものがみつかっているから、窓部の素材はガラスが有力である。ガラス（溶解石英）は、200～3000nmの波長域にかけて高い透過率（～99％）を示し、太陽光の可視光領域はほとんど遮られずに窓部を通過できる。一方、この波長域から外れた光に対しては、透過率はほぼ０％におちる。ガラスは、人体に有害な紫外線を遮断する点で有利であるが、宇宙植民島内からの熱放射も遮断され、陸部の放射による熱処理Hrを低める原因となる。しかしガラスより優れた窓部素材は、質・量ともに他にみあたらない。

本節では宇宙植民島内の環境保全の立場から、窓部の温度を定め、そのときの熱収支を概算する。そして窓部が、大気を冷却し、気化した水蒸気を凝結させる低温熱源として機能しうるか否かを検討する。

我々は窓部の温度の決定を、自然過程にまかせておくわけにはいかない。窓部に、大気の低温熱源としての役割を期待する観点からすれば、低温である方がいいだろうが、その反面、宇宙への放射は小さくなる。その上、表面に水が凝結したり、凍りついてしまうようでは、窓部の透過率が悪くなるし、水の回収が困難になる。これらの事情から、窓部の温度は０℃以上でなければならない。§４において放射による熱処理Hrを見積もる際、窓部の温度を275Ｋとしたのは、このような理由からであった。

まず自然過程においては、窓部は何度になるかを概算する。いま窓部が１枚のガラス板からなるとし、可視光領域の透過率を 100％とする。すると窓部が受けとる熱は、宇宙植民島内側の、陸部，窓部，陽壁，陰壁からの放射、ならびに接触している大気からの伝導（窓部の表面で凝結する水蒸気の潜熱も含む）となる。窓部が受ける放射は、厳密には場所によって異なるが、近似の方法として、§４で陸部地表の放射Hrを見積もったのと同じ手続きをとり、天球の立体角２πが陸部と窓部によって１：１で占められているとみなす。はじめに大気からの伝導を無視して、放射だけによる熱量の収受に着目する。窓部の温度をT_w、陸部地表の温度を 290Ｋとすれば、平衡状態において次式がなりたつ。左辺は窓部の宇宙植民島内部と宇宙への放射、右辺は内側が受けとる放射である。

$$2\sigma T_w^4 = \frac{\sigma T_w^4 + \sigma (290)^4}{2} \qquad (6\text{-}1)$$

$$\therefore T_w = 220\mathrm{K}$$

実際には、この計算で無視した大気からの伝導があるから、Ｔはもっと高くなるが、これでは窓部に凝結した水蒸気は、ただちに凍りついてしまうだろう。次々と大気から熱が伝導されることによって、T_w ＝ 275Ｋとできた場合、窓部が大気から奪わなければなら

ない熱量をCとして計算すると、

$$2\sigma(275)^4 = \frac{\sigma(275)^4 + \sigma(290)^4}{2} + C$$

$$\therefore C = 286\ \mathrm{J/m^2 \cdot sec} \qquad (6\text{-}2)$$

となる。しかしこれだけの熱量が伝導だけによって（たとえ大気から手際よく熱を奪う工夫があったとしても）窓部に与えられるとは考えづらい。宇宙植民島においては、窓部が大気の下にあることが、窓部の低温熱源としての活躍をむつかしくしている。窓部との接触によって冷えた大気は地表、すなわち低空にたまり、上空の暖気とすみやかに場の交代を行うことはない。地球大気にみられる対流が現れず、遅々とした上空大気から接触大気への熱伝導しか熱量の移動が存在しない。

さらに、窓部の表面に凝結水を付かせるのは、先述したように、水の回収を困難にするので奨励できない。そこで窓部に低温熱源としての役割を担わせるのを放棄し、大気からの伝導熱に頼らずに（C～0）、窓部温度T_wを275K以上に保つようにする。陸部の土壌を保温するために断熱層を重ねたように、窓部も何枚ものガラスによる多層構造になっているとすれば、保温が可能である。宇宙植民島の内側から窓部のガラスを第1層，第2層，……，第N層とし、それぞれの温度を$T_1, T_2, \cdots\cdots, T_N$とおく。ガラスは赤外領域に対しては、透過率は0％で、黒体とみなすことができる。各層の熱収支についての式が(6-3)で、各式の左辺が放出、右辺が収受である。

$$\begin{aligned}
&\text{第 1 層} : \quad 2\sigma T_1^4 = \frac{\sigma T_1^4 - (290)^4}{2} + \sigma T_2^4 \\
&\text{第 2 層} : \quad 2\sigma T_2^4 = \sigma T_1^4 + \sigma T_3^4 \qquad (6\text{-}3) \\
&\quad\vdots \qquad\qquad\qquad \vdots \\
&\text{第 N 層} : \quad 2\sigma T_N^4 = \sigma T_{N-1}^4
\end{aligned}$$

これらのNつの式は、最終的に次の2つの式に要約される。

$$\begin{aligned}
T_1^4 &= N T_N^4 \\
(290)^4 &= (N+2) T_N^4
\end{aligned} \qquad (6\text{-}4)$$

窓部第1層の温度を 275Kとすると、N＝8.45と計算される。つまり保温のために9枚ほどのガラスが必要となる。

窓部は実際には、宇宙へ何の支障もなく放射しているわけではない。太陽光で暖まった反射板からの熱放射の分が、その場からの立体角に応じて、さし引かれる。するとますます窓部の放熱はむつかしくなるが、そもそも窓部は事故対策として何枚ものガラスを重ねなければならないから、初めから低温熱源としての機能を欠いていたわけである。

では大気を冷却する低温熱源をどこにすればよいのか、という問題が生じる。しかし我々はすでに素晴らしい低温熱源を発見している。それは陸部の「地下」である。

§5と本節において、何枚もの層に対してStefan-Boltzmannの法則を適用してきたが、

この計算は惑星大気の温度分布を求める手続きに類似している。惑星では大気の上層が宇宙に面しているが、宇宙植民島では陸部の地下が、地表と同じ面積で宇宙に面しているために、計算の向きが上下反転しているのである。

陸部地下の大気冷却機構については、§８で取り上げることにする。

§７．陽壁・陰壁の熱収支

陽壁・陰壁の２つについては、比較的簡単に済ます。陽壁・陰壁は高温熱源や低温熱源としてあらわには機能しないと思われる。なぜなら、陽壁・陰壁は一枚壁ではなくて、構造的にも堅牢で、内部には人類が利用する様々な施設が入るだろうから、断熱性に非常に優れているからである。特に中心軸近くには宇宙港や科学実験所などが設営されると思われる。断熱性の議論となれば、§４の大陸部地下と同じような議論の運びとなり、やはり工学的にはさほど支障はない。しかしどんなに断熱を周到にしても、植民島内から見れば陽壁には熱の湧き出しがあり、陰壁には熱の吸いこみがある。できるならばその熱量は小さく、両方の壁で等しいのがよかろう。もしそうでないなら、内部への影響も無視できなくなり、位置によって陸部や大気の熱収支が変わるという複雑な事情が生じる。

陰壁にラジエーターをとりつけて、大気の低温熱源として利用する案もでているが、以上の点で疑問がある。そこで本論では、陽壁・陰壁を貫く熱流量は、大気の断面方向の様態を、著しく変えない程度だとする。こうすることによって、対流は主に断面方向だけに限られ、以後の検討がやりやすくなる。

§8. 陸部地下 大気冷却機構

宇宙植民島の大気上層、つまり回転軸付近は、大気を冷却する低温熱源としてはほとんど役に立たない。たしかに地表から高くなるにつれ、気圧は低下して、上昇気流は断熱冷却をこうむる。しかし地球大気のように、宇宙空間（～３Ｋ）に開かれていないため、放射によって自身の温度を下げることができない。熱放射は窓部を透過できないからである。もし窓部が宇宙空間と同程度の温度ならば、それに近い効果があるだろう。しかし§６において、窓部の透明度を保つために、その温度を気温と大して違わないものに設定する必要があることは指摘した。ガラスが多層構造である制約からも、窓部を貫通する熱量は小さくなるのである。宇宙植民島の大気は、ピラミッド状に上空ほど狭まるのも、忘れてはならない。

以上のようなことを考えれば、宇宙植民島の大気の低温熱源として最も適当なものとして残っているのは、陸部の地下だけである。本節では陸部地下の大気冷却機構の概要を説明する。

§５でみたように、陸部の地下は常に寒冷化にさらされている。そこでこの陸部地下（土壌・土壌保温材の下）に、もてあましている低温を利用して、水蒸気の凝結ならびに大気からの奪熱をおこなう設備をつくる。大気から奪った熱は、陸部の底が常に宇宙空間へと開かれているために、容易に放射によって処理することができる。凝結した水は、凍らせずに液体のまま回収し、地表の林農地へ散布する。冷やされた大気も同様に、地表に返還する。このとき、冷却した大気の温度を地表気温より低くして、土壌から過剰な熱を奪うような工夫もできるかもしれない。

陸部の地下は、地表と同じ広大な面積を利用することができるのを、利点の一つとして挙げることができる。地下には、土壌の過剰熱を吸着する機構も入っているので、全てを大気冷却機構に充てるわけにはいかないが、広さが足りないときは陸部の底にラジエーターのような凸凹の突起をつけるなどして、放熱性を高めればよい。

さらに低温熱源として優秀な点として、排熱量をコントロールできることがある。窓部のように大気と常に接触している部分を低温熱源とすると、排熱が自然に進行してしまい、宇宙植民島の気候が地球環境に近くなるという保証はない。陸部地下を利用する場合、その冷却施設へ送る大気の量を増減することで、その時々の排熱量を調節できる。これによって、大気に保持されている熱量も、我々が直接的に制御することができる。

結論として次のようにまとめることができる。宇宙植民島の大気は、陸部の林農地から放出される水蒸気や熱を、地球大気と同様に吸収しなければならない。そして大気はそのことによって増加するエントロピーを低温熱源に廃棄しつづけることによって、水蒸気や

熱を吸収できる状態に維持されている。その際の宇宙植民島大気からの放熱および水蒸気の凝結過程は、地球大気のように自然過程のうちに進行するのではなく、陸部地下の大気冷却機構に大気を導くという、人為的操作によって達成されるのである。

この大気冷却機構についての、技術的な詳しい検討は行っていないが、陸部地下の低温熱源としての利用は、現在の工業技術からの転用がきき、さほど困難な問題はないだろう。むしろむつかしいのは、この大気冷却機構をはじめ、反射板の太陽光反射率、治水・灌漑、各部の熱収支などを総合した、宇宙植民島全般の環境制御であろう。我々が巧みな制御術を修得することは、宇宙植民島を入植可能な、第二の地球とも呼べるものする必要条件である。

もちろんコンピューターの支援も不可欠であろうが、最終的には我々自身の自然環境についての理解力が問われるであろう。

§9. 大気の循環

シリンダー型宇宙植民島の大気の循環パターンについては、すでにコンピューター・シミュレーションによる解析が松田卓也によって発表されている[7]。松田論文の概略を紹介し、それを参考にしながら、宇宙植民島に備えるべき大気冷却機構について考察する。

松田は、陸部地表の温度は一定で、窓部の表面よりもわずかに高いとし、また、放射による熱の移動は無視して、熱伝導だけを考慮してシミュレーションを行った。

それによれば、軸に垂直な断面内には、陸部と窓部の温度勾配によって３つの循環が現れる。１つの陸部と、植民島の自転と逆方向に隣合わせる窓部が１セットとなり、その上空に１つの循環が対応する。その厚さは約600mで、陸部と窓部の境界線上では常に陸部向きの風が吹く。循環より上空は平衡状態に近く、大局的な運動はみられない。その様子を図７に示す。この循環を松田は、“window-wind”と呼んだ。

一方、回転軸を含む面内には、陽壁と陰壁の温度勾配によって緩やかな大循環が現れる。陽壁は太陽光によって暖められているから、接触した空気は上昇し、回転軸付近に集まろうとする。かたや陰壁は宇宙に放射して冷えているから、接触した空気は地表へと降りていく。その結果、回転軸付近の大気はゆっくり陰壁方向へ、地表近辺の大気は陽壁方向へと移動する。上空大気の典型的な移動速度は、断面循環の百分の一程度。そして、陸部や窓部にも軸方向の温度勾配があれば、断面循環とほぼ同じ厚さの、軸方向の循環が現れる。その様子を図８に示す。

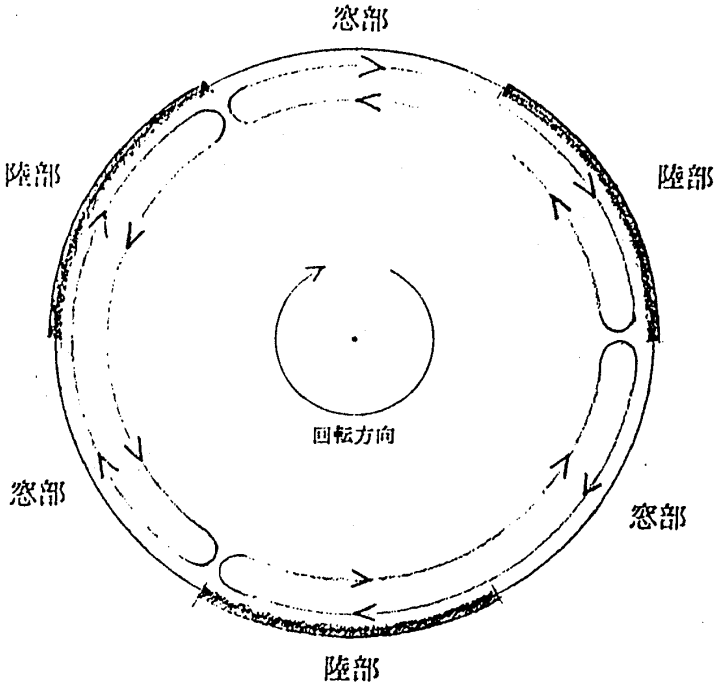

図７　断面循環

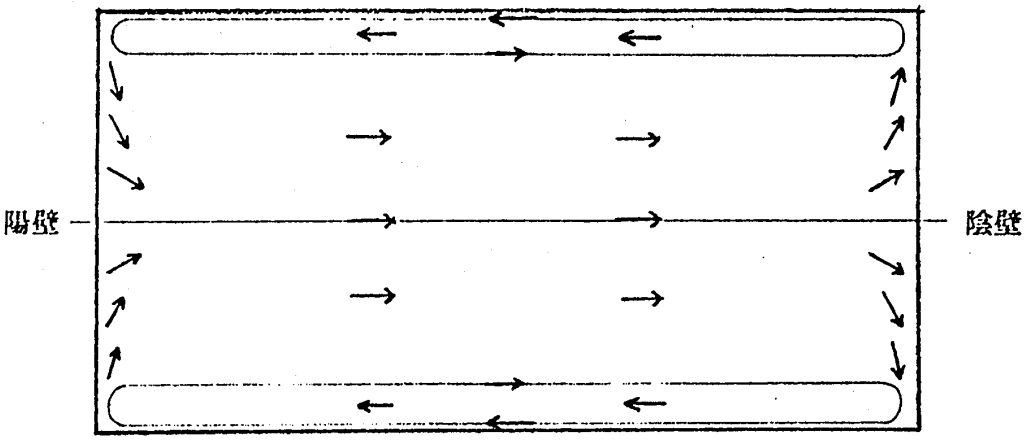

図８　軸循環

松田論文で使われているモデルには、陸部地下の大気冷却機構は盛り込まれていない。もしも宇宙植民島が、地下で冷やした空気を束にして局所的に放出するような造りであれば、大気循環に大きな変更を強いるであろう。その際シミュレーションは複雑になり、ともすれば大気循環の解析を一からやりなおさなければならないような事態に陥るおそれがある。そこで冷却済みの空気は、陸部地表から一様に大気に混ぜながら返すとする。

松田論文によれば、陸部と窓部の境界線に吹く風の速さは、（$\Delta T / T_0$）Vになる。ΔTは陸部と窓部の温度差、T_0はそれらの平均気温、Vは宇宙植民島地表の周転速度(171m/s)である。

本論で用いてきた陸部温度 290K、窓部温度 275Kから計算すると、風速9m/sとなり少々強い。風を弱めるには、窓部の温度を高くする、つまりガラスの層をさらにふやすことになり、窓部の低温熱源としての機能は、完全に潰えたと考えてよいだろう。また、地下で冷却された大気を陸部地表で一様に戻すことには、陸部地表のみかけの温度を低める効果も期待される。これは先の循環破壊の防止策と合致する。すると陸部と窓部の実質的な温度差は小さくなって、window-wind は地表での活動の支障とならないほどに弱まるだろう。さらに地下冷却施設への空気輸送に、window-wind を利用すべく吸気口を陸部岸辺に設けたのを、模式的に描いたのが図9である。

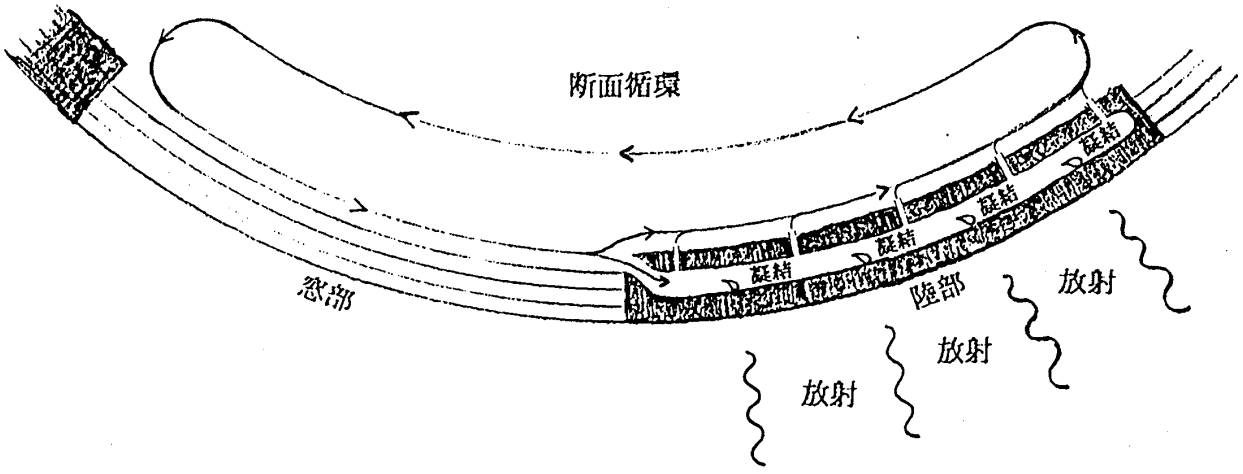

図9　陸部地下に大気冷却機構を設けた断面図

§2の定常大気の解析によれば、断面循環の高さ600mは、地表で湿度70%だった空気が飽和湿度に達する高度630mに非常に近い。薄い霧のような雲が、大気循環の上層に発生する可能性はある。しかし雨滴にまで成長したとしても微々たるもので、落下の途中で蒸発してしまう程度のものだろう。

§10. 結・宇宙植民島の存立

§9までの議論を総合して、宇宙植民島の存立を考察する。他にもまだ考察すべき多くの問題が残されているが、熱収支に議論を絞った本論の結論として、宇宙植民島の大気は、林農地を扶養する能力を持ちうるのではないかと考えられる。ただし、我々が環境保全に不断の注意をはらい、大気の状態を地球様に保つ、巧みな環境制御をなすことがその必要条件である。自然過程によって生物生存が可能な環境が維持される地球とは異なり、宇宙植民島では環境を人為的に調えるという、多大な積極性が必要とされるのである。

では実際に、地球的環境の維持をやりおおせたとして、陸部の上には、どのような生態系が築かれなければならないのだろうか。地球上の生物群を、生態系の食物連鎖における役割にもとづいて、緑色植物を生産者、人間を含む動物などを消費者、そして動植物の屍や排泄物を分解する菌類などを分解者として、3つに分類できることはよく知られている。これら生産者・消費者・生産者の、3者間における捕食関係の均衡が、地球上では定常的な物質循環を成り立たせており、もちろん宇宙植民島においてもこのような循環の存在が、永続的存立の必要条件となる。さらに、宇宙植民島が人類の入植を前提とする以上、宇宙植民島のスペース内で物質循環が成り立ち、なおかつ消費者のグループの中に、できるだけ多くの人間を位置づけた生態系の設計が、重要なものになってくる。

今のところまだ我々は、宇宙植民島への入植者数を見積もることができるだけの、精密かつ総括的な環境科学や実験データを持ち合わせていない。その点、O'Neill による入植者数の計上は、具体性に乏しい、構想の域を出るものではなかった。今後の環境科学の進展によって、次第に宇宙植民島の環境設計も詳細に検討できるようになるだろうが、宇宙植民島建設を推進しようと考える人々は、今後は単なる構想図だけではなく、より具体的で緻密な内部環境についての描像を提出するべきであろう。

以上のような理由で、不正確となる恐れはあるが、ごく簡単に宇宙植民島の農業生産高を見積もって、参考までに入植者数を計上してみよう。いま陸部をすべて水田として、稲作を行う場合を考える。稲の玄米収穫高は1haあたり約5tである[8]。人間一人が1年間に 100kgの米を食べるとすれば、単純計算でシリンダー型宇宙植民島1基につき 141.4万人分の食糧供給ができる。二期作制にするなら、その倍になる。

ただしこの数値は、現代農業の生産高から借用したものなので、宇宙植民島の入植可能人口はもっと低くみる必要がある。というのは、宇宙植民島には化石燃料が存在しないため、現代農業を行うことはできないからである。化石燃料の中でもとくに石油は、現代農業にとってはもはや不可欠な物質である。石油燃焼から抽出した動力による素早い耕地整備、化学肥料の大量投入による耕地の滋養強化の2点において、石油は大きな貢献をして

いる。結果として、単位耕地面積・単位農期あたりの収穫は、現代都市文明を支えられるまでに発展した。宇宙植民島では動力は太陽光発電からの電力で代替がきくが、化学肥料の原料となる物質が存在しない。その上、化学肥料が長期的には土壌の脆弱化をもたらすこと、そして化石燃料の使用が地球大気の汚染という事態を引き起こしていることを考慮すると、宇宙植民島では化石燃料がたとえあったとしても使用を避けなければならない。むしろ我々や家畜の労力や排泄物を、積極的に農業に活用するべきなのである。

動物の糞尿や枯れ草などの自家性肥料だけによる稲作の生産高は、どのくらいであろうか。例として明治初期の日本での玄米収穫高をあげると、1haあたり約2t[8]であり、現代農業の40%にまで落ち込む。もちろん、現代までに蓄積されてきた品種改良や育成技術の向上は、宇宙植民島においても活用できるので、明治初期よりも増収は期待できる。とりあえず現代農業の半分の収穫高とみなすと、二期制でようやく 141.4万人の食糧維持ができる。

今までは農産物は米だけとしたが、現実には米よりも永続的生産性が低い（連作障害がある）麦，トウモロコシなど穀物の畑地や、家畜飼育のための草地なども用意することになる。森林も、鉱物資源のない宇宙植民島では貴重な資源となるだろう。宅地，公共施設などの土地もいる。これらをすべてみつもった上で、入植可能人数が計算されなければならない。最終的には、適切入植者数は 141.4万人の数分の一、十数分の一近くまで減少するのではないだろうか。

ちなみに食糧が余ったとしても、輸出はできない。なぜならば、輸出した農産物の分だけ、宇宙植民島の希少な物質を流出してしまうことと同じだからである。もし月面基地や宇宙ステーションなどに食糧を輸出するとしたら、農産物とそれに見合った分の酸素を送り、その代りに、それを食べた人間の糞尿および空気中に排気された二酸化炭素を、宇宙植民島に戻さなければならない。さもなければ、永続的な物質循環は破壊される。宇宙植民島には地球のような広大さはない。人類生存のための切り詰められた自然しかもっていない。もしも人類が地球上で日々犯しているような資源の過剰使用に走るならば、宇宙植民島はただちに萎えて、人類生存に適した環境は破壊されるであろう。

以上で宇宙植民島についての一連の考察を終える。ここでもちいた物理学的な背景は、きわめて初等的なものであるにもかかわらず、宇宙植民島に新たな知見を添えることができた。宇宙植民島が本当に人類にとって必要であるのか、また、このような巨大な構造物を建造するだけの余力が人類にあるのか、という疑問は依然として残っているが、宇宙植民島の熱収支問題は、基本的な環境科学の一例題として適しており、今後さらに精密なシミュレーション ——とくに農業について——が行われてもよいだろう。その成果は、地球上における我々の生活にも、意義ある示唆をあたえるはずである。

註

1) C.K.O'Neill:"The colonization of space" Phys.Today Sept.(1974) pp.32-
2) 勝木　渥：『地球・生命・エントロピー』物性研究 53-4 (1990.1) pp.375-430
3) 気象ハンドブック　朝倉書店 (1979)　pp.332 図9-2
4) 気象ハンドブック　朝倉書店 (1979)　pp.333 表9-1，
エントロピー　朝倉書店 (1985)　pp.105 表2
5) 気象ハンドブック　朝倉書店 (1979)　pp.334 図9-5
6) 苅住　晟：樹木根系図説　誠文堂新光社 (1979)
7) 松田卓也："Meteorology in a Space Colony"
J.Phys.Soc.of Japan Vol.52,No.6,June(1983) pp.1904-1907
8) 嵐　嘉一：近世稲作技術史　農山漁村文化協会 (1975)　pp.116 第2-12図

※なお、論文中でもちいた物理的な数値は、ことわりがないかぎりすべて「理科年表1989年版」(丸善)によった。

参考文献

勝木　渥：地球・生命・エントロピー
物性研究　53-4 (1990.1)
河宮信郎：エントロピーと工業社会の選択
海鳴社 (1983)
：太陽光の仕事能力と地球システムのエントロピー代謝
中京大学教養論叢 第25巻 第2号 (1984)
槌田　敦：資源物理学入門
日本放送出版協会 (1982)
松田卓也：Meteorology in a Space Colony
Journal of the Physical Society of Japan
Vol.52,No.6,June(1983) pp.1904-
小野　周，河宮信郎，玉野井芳郎，槌田　敦，室田　武 (編)
：エントロピー
朝倉書店 (1985)