

閉鎖生態系生命維持システムと 制御生態系社会維持システム ——宇宙開発技術の地上社会への転移——

杉 山 貞 夫

1. はじめに
2. 人間の生存環境としての宇宙
3. 月面基地での人間活動に及ぼす
心理・社会的影響
4. 宇宙閉鎖生態系内での人間生活上の
諸要因と検討すべき技術的諸問題
5. 制御生態系社会維持システムの考え方

はじめに

この小論は、現在進みつつある宇宙開発、とくに有人月面基地開発の概念計画に関するもので、科学、技術、その時代の思想と云ったものが密接に関わっている未来社会開発についての一試論である。地球上には多くの生物が存在するが、ヒトと云う生物は宇宙史、地球史の観点からみると、ほとんど瞬間的に進化し、また爆発的に増加してきた存在と云える。科学文明が人びとの間に育つにつれ、人間の外界認識は深化すると共にその対象領域は拡大しつつある。そして、ついに素粒子から宇宙にいたる広大なスペクトルの認識枠を獲得するにいたった。そのような認識をもった人間が、次世紀初頭にはさらに宇宙開発を試み、その宇宙認識をさらに拡大・深化させようとしている。

さて現在、多くの国において衛星ロケットが打ち上げられているが、米国と

ソ連がその打ち上げ数において最も多い。わが国でも宇宙開発事業団が商業衛星を、また、文部省宇宙科学研究所が主として科学技術衛星を打ち上げ、宇宙科学の基礎研究に実績を持っている。また、紀元2000年以降の近未来に向けて、わが国の産業界、とくに重工業界、建設業界、電気業界、環境機器業界などでは、月面基地の完成に向けて学会と協力し、その技術的概念検討を既に始めている。云うまでもなく、一つの技術を完成させるためには最低10年から20年が必要であるが、現状では、技術完成年度は未定としても、概念検討を開始するには適当な時期と考えられている。米国のアポロ計画によって人間が月に到達したこと、またソ連が宇宙飛行士を長期間にわたって地球を周回させた事などによって、宇宙で生活する人間について考える機運が開かれた。既に、米国に於いては、クェール副大統領の管轄事項の一つとして月面基地開発、火星探査などがあげられており、遅ればせながら、わが国でも検討が開始されている。

一方、このような宇宙技術の時代に入って、人間の宇宙認識は次第に変わりつつある。かつて月は人の心の世界にあった。しかもそれは地上から見えながら触れることの出来ない夢の世界のものであり、人々の創造心をかき立て、さまざまな芸術の中にもそれは表現されてきた。良きにつけ悪しきにつけて、月と人びととの心理的な距離は縮小しつつある。自然科学と技術の発達によって、このように人間の認識枠は次第に拡大しつつあるのだが、以外に検討されていないのが、この人間のもつ認識枠の拡大自体についてである。

前述のソ連の有人宇宙軌道科学ステーション「ミール」は本体の重量25トン、直径4.2メートル、内部容積130立方メートルで、長期間宇宙滞在に備えて個室を完備し、6名が宇宙空間で生活できると云う。また、1960年代後半、アメリカのアポロ計画による月面探査では月面より採取した物質を地上にもち帰り多くの知見をもたらしたと共に、月面環境についての諸データを得ることに成功した。しかし、その中でも人類社会に最もおきな影響を与えたことは、人間が短期間ではあるが存在したと云う事実であろう。それは以後の宇宙開発、とくに有人宇宙探査を推進する機運を押しすすめたと云える。宇宙開発先進国である米ソの開発概念が異なっているのは、むしろ当然のことであるが、わが国

でも、将来の国家的、国民的利益を得るためにおおくの努力がなされている。

筆者はたまたま、人間科学、人間工学等の観点から月面基地の概念検討に参加することが出来たので、本論では、宇宙における人間生活に関して行ってきた研究会での講演資料等をまとめ、そこでの人間工学的問題、さらに閉鎖生態系技術の地上での利用の意義などについて通覧してみたい。

人間の生存環境としての宇宙

ヒトと云う生物は地球表面を覆ういわゆるバイオスフェアの中、とくに、地表面上に於いて進化したもので、それ以外の環境において生存するようにはできていない。また、その進化した過程を見ると、生存のために群れを形成し、いわゆる集団生活を営む特性を維持してきた。他にもそのような特性をもつものは生物の中でも多い。従って、諸事例を見ると、生物の中でも、まとまらない集団は生存できないのが常である。いかなる生物も、生物学的にはかかる基本原理ののっとっていればこそ、現在に至るまで進化してきたものと云える。明らかなことは、どのような意味においても、宇宙はヒトの生存に適する環境ではないと云うことである。そこでヒトが進化できるかと云う問題に興味をもつ人びとが多いが、それは不明である。いずれにしても、宇宙で人間集団の存在を可能ならしむるために、近年、閉鎖生態系生命維持システムの研究が、わが国でも始まった。そのシステムをもって将来、月面基地を構築し一定期間、人間集団が滞在し、月面環境を利用して宇宙観測、地球観測、月面の物質を使って新素材の開発などを試みようとしているわけである。

いかなる環境内に於いても人間の諸機能はフィードバック的に働くことが多いので、情報科学的にみて、人間機能を閉回路システムとしてとらえることが多い。しかし、人間生活に必要な物質とエネルギーの循環を見ると必ずしもそうとのみは云えない。その結果は最近の公害問題からもわかる通りである。従って、人間自体も完全な閉回路システムとは云えないことがわかる。むしろそれは物質とエネルギーを入力すると共にそれらを出力する開放システムとして考えた方がよいかも知れない。かかる人間が閉鎖生態系の中で生存し得るのか

と云うことについては多くの疑問が残されている。また、宇宙で必要とされるような孤立生態系、即ち、長期完全閉鎖生態系生命維持システムの達成は、技術的にもなかなか困難なことであろう。しかしながら、宇宙での長期滞在には、それが必要とされる。

生体そのままでは、即ち、何物かによって宇宙環境から隔離遮断されなければ、生体は瞬時にして機能を停止し、生命は消失する。隔離遮断された閉鎖環境内でのみ、宇宙においての生命は維持しうる。現在の技術で生存環境を隔離遮断することは不可能ではない。しかし、宇宙系からの不可知なインパクトの生起確率は、仮に低いものとしても、いったんそれが発生すればその影響を防止することは大変困難である。従って、環境遮断技術の開発と完全閉鎖生態系生命維持システムの開発が必要となる。ところで、元来、生態系とは生物とその生活の場を意味しているが、それには三種類ある。すなわち、物質とエネルギーの出入りがなく、完全に外界から遮断されている【孤立系】と、物質の出入りは殆どなく、エネルギーのみが出入りする【閉鎖系】、そのよい例は地球であって、太陽から良質のエネルギーを取り入れ質の低下したエネルギーを放射によって捨てている。最後のものは【開放系】であって、物質、エネルギーともに取り入れ、また捨てさる。そのよい例が人間である。問題は、人間という開放系が閉鎖系としての地球上で生活する点であるが、この点については後述する。

月面基地での人間活動におよぼす心理・社会的影響

月面基地における閉鎖生態系生命維持システムが設置されたとして、その中で人間が行う作業がどのようなものか—を推測することは、現状ではたいへん困難なことである。従って、作業計画を詳細に検討するのは現段階での検討事項ではない。極く大ざっぱに考えてみると、一つはその作業は集団で協調しながら行う作業であろうと予想される。第二に、その集団で行う作業は、恐らく、基地外活動と基地内活動の二種類の異なる作業と云うことになるが、基地内活動は観測、通信、制御と云ったいわゆる精神作業が中心となるであろう。それ

に対して、基地外での筋肉作業は重力の差による影響を直接受けることが予測される。しかし、精神作業と筋肉作業を明確に分離することは出来ないのが常である。従って、人間の心身両面の活動バランスをとる考え方が必要となろう。一方、作業環境の諸要因を計画する場合、物理的、力学的、化学的側面の検討も当然必要とされるが、同時に他の人間のかかわる要因、即ち、心理的、社会的側面の影響は無視しえないものがある。しかしながら、この側面については、まだ未解決の問題が多い。

心身機能のバランスをとることは、地上での生活においても当然必要なことである。そのバランスが乱れた時、さまざまな症状が発生するのも事実である。過度に精神作業に偏向した生活を営む人々の中には、不安に悩まされたり、人間関係に苦しんだり、家庭問題に悩みを持ったり、傷つけられた自己の威信に悩んだり、将来に不安をもったり、人々の支持を失うことを恐れたり—と云う人々が多く見られる。このような人々は如何に理想的な物理的環境内で作業しても、彼の力量を発揮することはできない。集団協同作業では、このような心理・社会的な影響が働くからである。しかし、これらの症状によって個人のパフォーマンスの低下やエラーの増加がもたらされるとは云うものの、はたして、その因果関係は確定的、且つ、明確なものだろうか。また、その事態を改善するにはどうしたらよいであろうか。しかも宇宙では、对人的にも、物理的環境条件も、また作業条件も非常にストレスが多いと予測されるのである。

次に、結果から推測してみよう。倦怠、抑鬱、不安、情緒不安定、精神疲労、敵意、引っ込み思案、動機不安定、緊張、睡眠障害、集中力減退、能力低下、恐れ、苛立ち、感情過多、怒りなどと云った心理的症状があらわれたとしても、それがはたして、精神作業のみに起因すると云えるであろうか。そのように考えてゆくと、ほとんどの場合、単純な因果関係というものは無いように思える。即ち、症候群としてそれはとらえられ、そこに見られるのは多くの原因と多くの結果の間に存在するかもしれない関係の複雑なネットワークと考えられる。それほどに人間の機能は、本来、統合的に働くもののようである。現在、NASAでも地上のシミュレータ内で比較的長期間隔離条件下で集団作業訓練を行い、

かかるストレス条件下での適性を見て要員の選考訓練を行う計画があると聞
が、一般に宇宙での人間活動が、仮に相当長期間にわたる場合には、上記の
ような問題にも配慮する必要があるだろう。しかし、現実的には、もう少し即発的な
反応が現れる、またパフォーマンスに直接的に影響するような要因を考えなけ
ればならない。それは心身機能に対する直接的なストレスと考えることができる。
宇宙滞在は明らかに地上での生活とは異なり、そこに存在するだけで身体
的にはストレスとなる。さらにかかる悪条件下で精神作業を行うことは、心身
機能に対して多大のストレスとなる。それ故、ストレス耐性を資質と訓練の両
面から得なくてはならない。ストレスは作業や宇宙環境の特定要因、例え
ば、無重力や閉鎖空間ばかりではない。個人の精神活動を乱すおそれのあるも
のは、対人コミュニケーションの不全に起因する人間関係の混乱であり、コー
ディネーションを要する協同作業では、その影響は作業手順、個人の行う作業
量、作業タイミング、錯誤動作からの回復のタイミングなどに現れる可能性が
ある。従って、宇宙空間での精密作業は、熟練した個人の能力に依存するか、
あるいはコンピュータにまかせる必要があるかもしれない。しかし、機械系の
補修作業などでは人間の手が必要なので、この点集団訓練を行う必要があ
らう。

宇宙閉鎖生態系内での人間生活上の諸要因と 検討すべき技術的諸問題

宇宙環境内微小重力下での長期滞在例はソ連の有人宇宙軌道科学ステーショ
ン「ミール」による366日間が最も長い。その間、生体から得られたデータは医
学的・生理的なものが主であって、宇宙環境内での長期間生存可能性を調べる
意味で最も基本的なものである。ここでは宇宙滞在が長期にわたると仮定し、
その間、閉鎖生態系内で数人の人間が生活し、また、仕事をすると云うことを
前提に考えてみたい。

月面基地で予想される心理社会的影響をもたらす環境条件はつぎの通りであ
る。

- (1) 孤立・隔離・拘束的条件
- (2) 狭い閉鎖空間
- (3) 地球とは異なる時間帯での生活
- (4) 被監視条件下での生活
- (5) 異なる重力によって動作の微調整が要求される生活
- (6) 生命の危険に常時曝される不安
- (7) 長期間にわたる同じ集団での協同生活
- (8) 支援が即時に得られない不安
- (9) 長期間にわたる人工的環境内での生活
- (10) 移動の制限
- (11) ルーチン化しやすい生活スケジュール

心理社会的な症候をもたらしやすいこのような生活条件は、当然地上では避けなければならないのだが、これらからのストレスは相当なものとなる。ヒトの生理的耐性よりも、人間の心理社会的耐性が要求される事態である。地上での適性が宇宙での適性となるかはわからないのだが、今後宇宙へでかける人が多くなるにつれ次第に解明されるであろう。現状、考えねばならないことは、かかる状態の人間が8人、月面基地で少なくとも3ヶ月間協同生活をするための物理的環境条件を設定することである。そのため以下の問題について、予測による人間工学的・技術的検討がなされた。ここではそのごく一部の検討事項を示す。

居住系

(1) 環境制御系

雰囲気制御：空気循環・換気等気流制御

気体成分

酸素分離、炭酸ガス初期供給、窒素供給、
植物の気体再生、炭酸ガス回収、
ガスバランス機能、汚染ガス除去、窒素固定、
粒子除去、バイオハザード

気体漏洩制御

温度制御

湿度制御

圧力制御

音響制御

照明制御

色彩制御

形状制御

水処理： 貯水・清浄度管理

水の再生

配水

水温制御

水質管理

排水貯蔵

廃棄物処理：排水収集

廃棄物収集

衛生設備： トイレ

尿収集管理、大便収集管理

ゴミ・残飯収集管理

汚染不燃物収集管理

排泄物・ゴミ・残飯分解・残飯類分解（湿式酸化設備）

植物栄養液生産

塩・ミネラル回収

身体洗浄

毛髪洗浄

棟内清掃

消毒

医療設備： 診断・検査システム

治療・処置システム

医療情報通信システム

休養・病床設備

消毒設備

食料供給： 食料貯蔵システム

調理システム

配膳・後始末

(2) マン・システム

居住区画： 睡眠設備、休憩・団らん設備、個人用収納庫、

通信設備、照明設備、安全設備、運動設備、娯楽設備

(3) 防災システム

防護システム：

宇宙線（太陽風）対策、いん石対策、

太陽フレア対策、宇宙塵対策

災害対策：

災害感知、災害予測、災害制御、危険物管理・制御、

消火設備、減圧対策

救援システム：

緊急通信システム、緊急医療システム、

緊急退避・脱出システム

(4) 補給貯蔵システム：

気体（各種ガス）貯蔵

液体貯蔵

個体（大きさ、形状、材質等）貯蔵

食料（大きさ、形状）貯蔵

これらのシステムは人間が月面基地で生存するために最低限必要なものであるが、それ以外に作業ステーション、観測ステーション、植物モジュール、発電システム、月面車両など多くの施設・機器類を検討しなければならない。当

然ながら、地球から月面の一定位置までこれらの諸設備を運搬するロケット、月周回衛星等の検討も必要である。上記の諸システムは月面探査のごく初期段階において必要とされるものであるが、プロジェクトが進むにつれて膨大な人工システムが必要となる。

これらの項目を列挙することは簡単であるが、それら一つ一つに対応した技術開発が必要となる。またその結果、機器類が製作されるのだが、それらはフェイル・セーフの原則に則って二重、三重に独立したシステムとしなければならない。しかし、これらの技術開発は当然、地上の社会でも利用することができるもので、とくに雰囲気制御技術、水処理技術、廃棄物処理技術、医療設備システム、一部の防災システムと災害対策技術などは地上の工場やビルなどの諸施設や艦船などの閉鎖環境でも利用しうる。

だが、閉鎖生態系の技術をもってしても前述の心理社会的環境条件を緩和することは至難である。生命の保全は達成できても、人間の満足を得ることはできない。それは個人のもつ動機と意欲の問題でもある。また、この人間社会が宇宙開発に対して抱く意義やその重要性にかかっているともしえよう。現在、考え得る唯一の対策は、比較的短期間で人員を交替させることである。それによって月面体験者が増加し、その経験を次段階での技術開発に応用しうる。現在の段階で最も大切なことは、月面基地が人類の未来にとってどのくらい重要か一と云った価値付与の問題である。

制御生態系社会維持システムの考え方

宇宙開発技術は何も宇宙のためだけに限られたものではない。一つの未来志向型の技術である。それだけに宇宙開発技術を地上社会へ転移させることが可能となる。

その領域の第一は、不要物質とエネルギーの地上への無制限流出を防止するため、閉鎖生態系技術を応用することである。第二には、過剰エネルギーの使用を前提とした社会システムの改善である。これは現在対策が得られていない。第一の課題については、すでに本論中でも過去の基本的認識の誤りとして

指摘してあるのでここでは触れない。ここでは第二の問題に触れてみる。

現在、建築構造物は空中に、また地下に向けて延びつつある。それらはみな人工的環境であり、それらが人間にとっての仕事の場となり、また生活の場となりつつある。現在、概念設計の進みつつあるものとしては、居住、業務、商業機能を内包した超高層建築群による機能的な情報都市計画、業務スペースと居住スペースと緑豊かな自然を両立させる人工地盤上の都市など、数多くの概念が提示されているが、それらの多くは閉鎖環境と開放環境の組合わせとそれらの間の効率的移動が前提となっている。また、地上には自然を再生させ、工場など物質とエネルギーの加工を計る諸施設を複合機械系として、地下に設置すると云う概念計画もある。

前述のように、生活環境の人工システム化ばかりにではなく、この閉鎖生態系生命維持システムで検討されている技術は、地球上でも人間の生存に適さない海中や寒冷地帯、また砂漠地帯での居住システムの開発などにも応用しうるものである。そして、それらは最低のエネルギー消費とほぼ十分な公害対策を備えたものとなろう。

しかしながら、現状では閉鎖生態系と云う考え方は社会に受け入れられてはいない。しかし、計画されている月面の閉鎖生態系は、人間の放出する炭酸ガスと必要とされる酸素のバランスは植物棟内で育成される植物の光化学反応に依存しているが、地球生態系では人間社会の営み、とくに産業活動の結果、そのバランスが乱れ地球温暖化現象が発生するとして現在環境論議をもたらしている。かかる環境論議は元はと云えば、地球があまりにも巨大なため、地球を開放生態系と考えていた誤りに起因していると云えよう。現在、いわゆる炭酸ガス固定技術がすすめられているが、かかる技術の応用には、どうしても閉鎖生態系の認識が必要である。それは物質とエネルギーの回路を閉鎖環境内循環としなければならないことを意味している。しかしながら、都市環境計画などに於いても、現状、かかる発想が十分に展開されているとは云い難い。

あたかも有機体の機能構造を見る思いがするのが、いわゆる複合社会システムであり、それはあたかも人体システムそのもののようである。個々の人間の

生命を維持し、最低限のエネルギーと物質循環によって生活を営ませるだけで如何に膨大な設備が必要かを本論では考えてきたが、それに要する費用の問題は別として、もしこれらの技術が成熟し、その結果が地上での生活環境の計画に応用されると、将来の環境保全のために得られる利益は計り知れないものがある。残念ながら現状、社会計画では、それを実現させる上で必要とされる技術とはどんな技術か—と云う観点からは考えられていないようである。ごく部分的に、且つ観念的にしかとらえられていないと云ってよい。その必要技術とはエネルギーと物質の循環に関するものである。この点が前述の第二の課題である。

地球を閉鎖系としてとらえる場合、人間が消費するエネルギー量はその生活様式に依存するという考え方が必要である。推測によるものであるが、近代的科学技術時代に住む人びとの消費量と原始時代の人のそれとを比べると分かる。図1, 2は、Cook (1971) より筆者が再計算したものである。科学技術時代に於いては、人間一人の生命や生活を維持するのに、如何に大量のエネルギーが必要とされるかが分かるであろう。時代の進展とともに見られるこの急速な増加傾向をどのようにして抑えるかが、今後の問題となる。その方向としては、第一に、技術開発による抑制、第二に、社会システムの改造による抑制、第三には、生活様式の改善による抑制の三つの方向が考えられる。

これらの図は人間の生活様式によっては、大量のエネルギーを消費するものであることを示している。しかしながら、その根拠がやや曖昧であり推測を含んでいるので、一応の傾向として見るのがよいと思う。ここで云う進歩的農耕社会とは、紀元1400年頃、北西ヨーロッパで石炭、水力、風力や畜力が使用された社会を指している。工業社会とは、蒸気機関が利用されはじめた1875年頃と理解できる。科学技術社会とは、電力消費が増大した1970年頃のアメリカを考えている。原始社会は人類が火を使用する以前(100万年前)を、狩猟社会は食物が増加し、人類が火を利用しだした10万年以前を、未開農耕社会は5000年前穀物を栽培し、畜力を利用していた時代を考えている。図1は一日一人当たりのエネルギー消費量が、時代を追って変化した社会形態によって増大してき

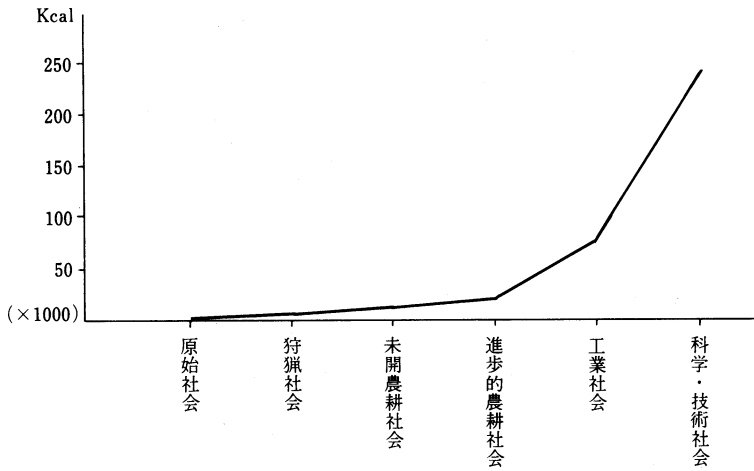


図1 社会形態の変遷にともなう人間一人一日当りのエネルギー消費量 (Cook, 1971より再計算)

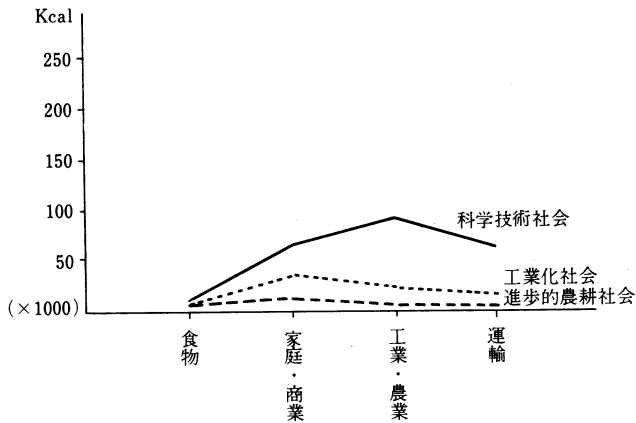


図2 三つの社会形態での食物、家庭・商業、工業・農業、運輸のエネルギー消費量 (人間一人一日当り) (Cook, 1971より再計算)

たことを示している。1970年にアメリカでは一人一日当たり23万 kcal を消費したと云う。図2はCookの図から杉山が推測したもので、人が食物からエネルギーを摂取し、家庭生活や商業などでエネルギーを利用し、また、工業や農業ではエネルギーを利用する。さらに移動のための運輸機関の利用によりエネルギーを大量に消費することを示したものである。産業革命当時の社会では、家庭生活、商業などでのエネルギー利用が盛んであったが、科学技術社会に入っすべてに、消費エネルギーは増大していると共に、工業と農業でのエネルギー消費が群を抜いていることがわかる。筆者が社会システムの改造と生活様式の改善が将来要求されると思うのは、この理由からである。

閉鎖生態系として仮に地球を考えてみても、まだまだ余裕はあるともいえる。しかしながら、それが開放生態系でないことは明らかである。とすれば、もし、その限界容量が近いと仮定した時、それについての社会的共通認識が得られるか、否かが問題であろう。また、仮にそれが得られたとしても具体的対策はその段階では見つからないであろう。多くの先例の示す通り、技術は先行投資と20年以上の歳月と人材を要するからである。筆者の考えるところ、人間生活は自由な開放システムであるとした場合、その達成は不可能となる。生活環境が閉鎖生態系であることについての認識が必要とされる。

しかしながら、人間が自由に進化しつつあるこの地球上で、完全閉鎖生態系を考えることは、ある意味では無意味なことである。なぜかと云えば、地上ではその必要がないからであって、筆者は、宇宙開発で利用される閉鎖生態系あるいは、孤立生態系生命維持システムの技術を応用して、制御生態系社会維持システム技術として、地上で利用することも重要ではないかと思う。

参考文献

- 1) Cook, E. : The flow of energy in an industrial society. Sci. Am., 225 (3) : 135 (1971)
- 2) McHale, J. : The Ecological Context. George Braziller, New York (1970)
- 3) Santy, P. : The Journey Out and In : Psychiatry and Space Exploration, Am. J. Psychiatry, 140: 5 (1983)

- 4) Santy, P. : Psychiatric Components of a Health Maintenance Facility on Space Station, Aviation, Space & Env. Medicine, Dec. 1987
- 5) Sugiyama, S. : Living and Working Facilities in the Space Station, Proceedings of the Pacific ISY Conference, Aug. 1987
- 6) 杉山貞夫、月基地での人間の行動学上の問題、有人宇宙飛行技術シンポジウム講演、日本学術会議・宇宙工学会（1989年1月）
- 7) 杉山貞夫、宇宙人間工学の視点、宇宙生物科学、第3巻第1号、日本宇宙生物学会
- 8) 渡辺 仁、人類の自然利用、環境と人間Ⅰ、新医科学大系11A、中山書店、東京（1984）