

*JOURNAL OF THE INSTITUTE FOR ADVANCED SPACE ACTIVITIES*

**宇 宙 先 端**

宇宙先端活動研究会誌

MAR. 1988

VOL. 4—NO. **2**

**IN THIS ISSUE,**

PROJECT PATH FINDER .....	45
MOON RESORVSE EXPLORATION .....	57
HUMAN ENGINEERING SERIES (2) .....	63

# 宇宙先端

宇宙先端活動研究会誌

編集局

〒105 東京都港区浜松町2-4-1  
世界貿易センタービル内郵便局私書箱165号

編集人

岩田 勉 TEL0298-51-2271 EX 341

編集局長

長谷川秀夫 TEL03-769-8230

編集顧問

久保園 晃	宇宙開発事業団理事
土屋 清	千葉大学映像隔測センター長
中山 勝矢	工業技術院中国工業技術試験所長
長友 信人	宇宙科学研究所教授
山中 龍夫	航空宇宙技術研究所宇宙研究グループ総合研究官

監査役

伊藤 雄一 日本電気株式会社宇宙開発事業部技師長

宇宙先端活動研究会

世話人代表

園山重道

世話人

石澤禎弘	伊藤雄一	岩崎茂弘	岩田 勉	上原利数	宇田 宏
大仲末雄	川島鋭司	菊池 博	五代富文	笹原真文	佐藤雅彦
茂原正道	柴藤羊二	鈴木和弘	竹中幸彦	鳥居啓之	中井 豊
長嶋隆一	長谷川秀夫	樋口清司	福田 徹	馬島亜矢子	松原彰二
森 雅裕	森本 盛				

## 目 次

1. プロジェクト パスファインダー・・・・・・・・・・ 45
2. 月面の資源探査ミッション・・・・・・・・・・ 57
3. 人間工学シリーズ（2）・・・・・・・・・・ 63

（次回予告）

1. 宇宙開発に発想の転換を
2. 人間工学シリーズ（3）
3. その他

# プロジェクト パスファインダー

木場田 繁

一月に公表された米国の新国家宇宙政策の中で、系統的で大規模な新技術開発計画「プロジェクト パスファインダー」の着手が指示された。

このプロジェクトの所要資金は10億ドルであり、1989年度NASA予算でも1億ドルが計上されている。

NASA/OAST の説明資料の抄訳を紹介する。

パスファインダー計画は、広範な宇宙ミッションを可能にし、米国非軍事宇宙計画の技術基盤を強化する研究・技術計画である。民事宇宙技術構想 (CSTI: Civil Space Technology Initiatives) で確立された基盤に立脚して、パスファインダー計画は、地球の徹底的研究、月への帰還、火星への有人操縦ミッション、及び太陽系の無人ロボット探査の継続など、新規及び将来型ミッションの両者を可能にする、革新的新技術を開発する。NASA、米国産業界及び大学間の強力な連携を通して、パスファインダー計画は、アポロ計画が1960年代にそうであったように、米国技術を前進させると共に、宇宙における将来の成功を可能にする。

パスファインダー計画は次の4つの主要分野に関して構成される。

(1) 探査

(2) 運用

(3) 宇宙における人間、そして

(4) 輸送系である。

どの分野も、クリティカルなミッション能力を支援する、重要な鍵となる一連の技術要素に焦点を置く。パスファインダー計画は進行中のNASAのミッションスタディを支援し、密接に関連づけられる。

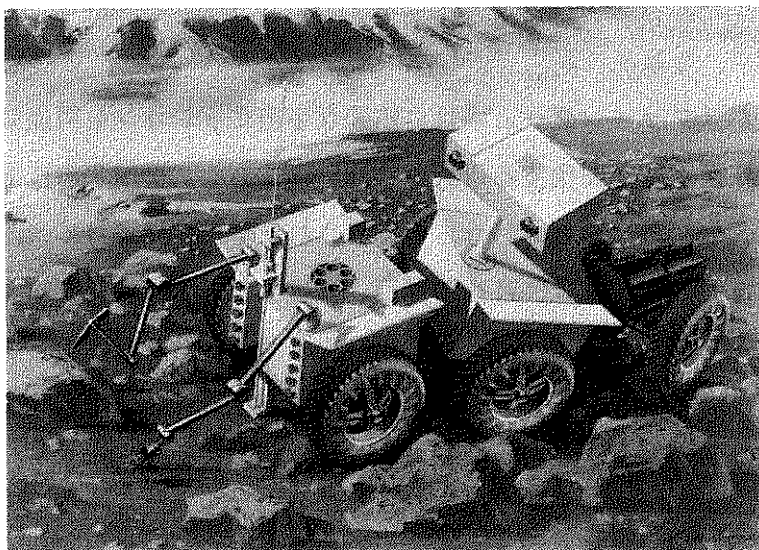
## 1. 探査技術

探査分野技術は、月、火星及び太陽系の他の惑星への無人ロボットミッションと有人操縦ミッションのための、科学及び工学的データを収集するのに必要なクリティカルな技術を提供する。

この分野の計画要素は、(1) 惑星移動車、(2) サンプル収集、分析及び保存、(3) [惑星等の] 表面上の動力、そして(4) 光通信である。これらの要素は、コストとリスクを低減しつつ、将来の太陽系のロボット探査と有人操縦探査に必須の将来型宇宙システムに必要な、クリティカルな能力を提供するよう設計される。

### 惑星移動車

惑星移動車技術の研究は、月と火星の広い範囲の自動及び有人探査のための必要とされる技術基盤を開発する。これらの技術は、ロボット探査、有人操縦ミッションのための無人先駆ミッション、及び月面拠点や有人操縦火星ミッションのシステムに適用される。



惑星移動車技術は、(1) 障害を自動的に乗り越えたり、避けたりする機動性と誘導性、(2) サンプル収集・分析・保存技術で開発されるサンプル分析技術と密接に連繋して働くロボットサンプル収集、そして(3) コンパクトで、軽量、高出力の搭載動力システムを含む移動車動力のための技術開発と整合試験に焦点を置く。

## サンプル収集、分析及び保存

サンプル収集、分析及び保存技術は、様々な惑星体から化学的、鉱物学的科学データの遠隔収集を可能にする。これらの技術は、ロボット探査、操縦ミッションのロボット先駆ミッション、及び月面拠点又は有人操縦火星ミッションの支援システムを支援する。

この計画要素は、(1) 惑星移動車要素のロボット操作活動と密接に結びついて開発される道具を含むサンプル収集、(2) サンプルの化学的、物理的分析、そして(3) 熱及び圧力管理を含むサンプル保存のための技術開発に焦点を置く。

## 月面動力

月面動力技術は、月面拠点の初期段階のための高性能で、低質量、高信頼性太陽発電や、短期間操縦火星ミッションのミッション要求の充足に必要な技術をねらっている。

計画は、将来型太陽発電や太陽熱発電といった動力供給技術と、高密度燃料電池といった動力貯蔵の両者の開発と試験に焦点を置く。月及び火星環境でのほこり及び化学的反応への耐久性は、性能にとってクリティカルである。

## 光通信

光通信要素は、ロボット及び有人操縦探査ミッション双方のために、深宇宙及び惑星体からの高解像データの伝送に必要な技術基盤を提供する。

計画は、光通信捕捉及び追跡検知器の開発を含む。クリティカルなハードウェア・コンポーネントが開発され、制御アルゴリズムなどの方法論が実証される。この通信技術の飛行試験はその可能性を実証する。

## 2. 運用技術

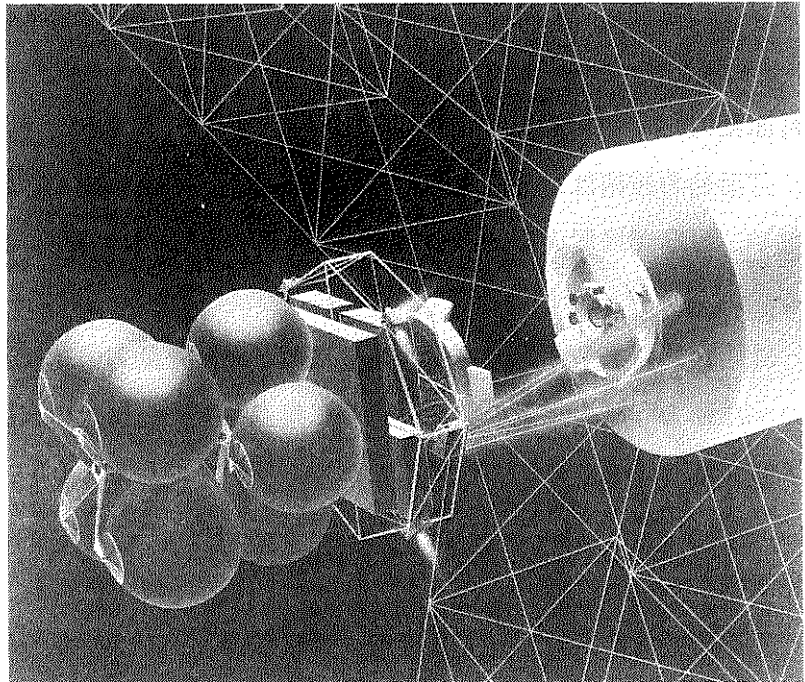
運用分野は、地球軌道上の拠点と運用、同じく月、火星及び太陽系の他の惑星での運用に必要な技術を提供する。

この分野の計画要素は、(1) 自動ランデブー・ドッキング、(2) 資源処理パイロッ

トプラント、(3) 宇宙での組立・建設、(4) 極低温流体貯蔵書、そして(5) 宇宙原子力電源 (SP-100)である。これらの要素は、地球軌道でのミッションに固有の宇宙インフラストラクチャと運用、又は太陽系のロボット及び有人操縦探査のための能力を、コスト削減しつつ、大きく向上させるよう設計される。

### 自動ランデブー・ドッキング

自動ランデブー・ドッキングな研究は、非有人操縦宇宙システムの信頼性あるランデブー・ドッキングを可能にし、更に有人操縦ロボットの信頼性を高め、かつ負担を軽くする技術を開発する。この要素は、月面拠点又はロボット及び有人操縦惑星ミッションのために、地球軌



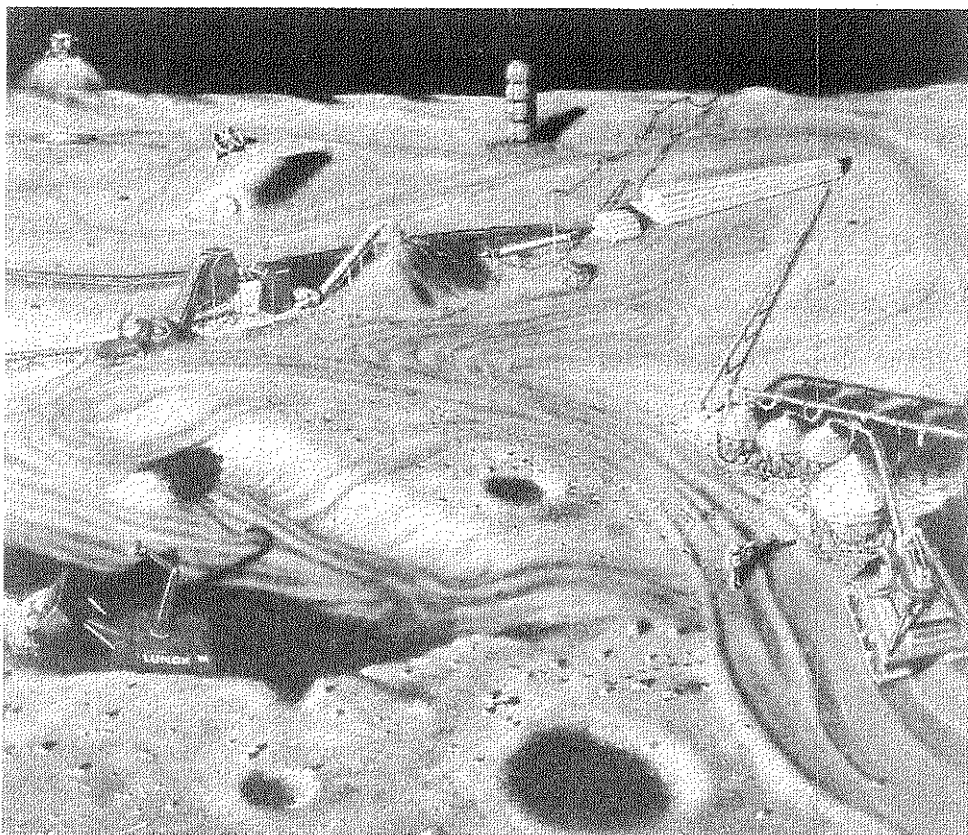
道での全般的な効率輸送を支援する。自動ランデブー・ドッキングの研究は、レーザー測距やロボット視覚を含む様々なセンサー技術の開発と試験を目的とする。リアルタイムでの多重センサーからの搭載データを結合する技術が開発される。不具合に許容性の高い誘導、航法及び制御技術の応用が実証される。

### 資源処理パイロットプラント

資源処理パイロットプラントの研究は、(1) 月面資源の取得、分析及び機械的/電気/化学的分離、(2) 酸素など生命維持と推進剤に必要な材料の製造、そして(3) 構体要素の製作と建設のために必要な技術を開発する。これらの技術は、地球・軌道間

打上げシステムと高コストな地球資源への依存を劇的に減らす。

資源処理パイロットプラント技術は、多様な種類の技術開発努力に向けられる。これらは、効率性、低出力使用、長寿命、簡便性等々を達成する採鉱加工方法の確認と評価、並びにテレロボットによる材料収集処理を含む。



### 宇宙での組立・建設

宇宙での組立・建設技術は、宇宙大規模構造物のロボット組立・建設に必要な技術を中心に開発する。それは、静止地球観測プラットフォーム、月面拠点及び有人操縦火星ミッションなどの大規模ミッションのための、広い基盤の宇宙インフラストラクチャの開発を支援する。

この計画は、(1) 大規模で、軽量の、それ故非常にフレキシブルなマニピュレーターを用いた宇宙構造物要素の操作、結合の方法、(2) 溶接といったような機械的、永久的結合方法の開発と試験を目的とする。



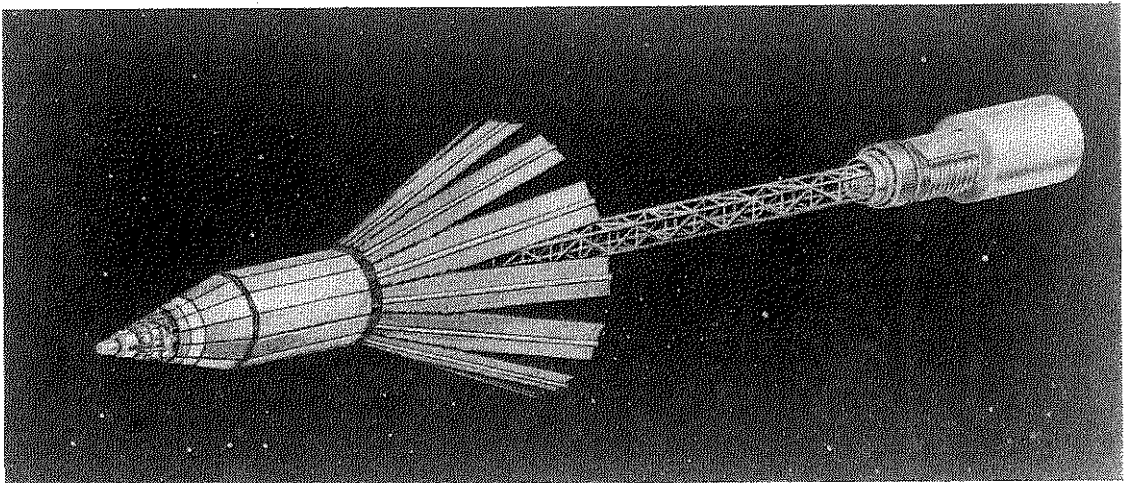
## 極低温流体貯蔵所

極低温流体貯蔵所技術は、微小重力下での広い範囲の宇宙ビークルにサービスする効率的なコンポーネントとシステム的设计開発を可能にする。極低温流体移送は静止地球軌道、月及び惑星へのミッション支援における強力な宇宙ステーション活動を可能にするよう実証される。

極低温流体貯蔵所要素は、大規模な極低温の収容、移送及び冷蔵コンポーネントシステムの開発試験に焦点を置く。

## 宇宙原子力電源 (SP-100)

宇宙原子力電源の技術研究は、NASA/国防総省/エネルギー省の共同計画であるが、10KWe から1MWe (1,000KWe) の範囲の宇宙原子力発電システムに必要な技術基盤を提供する。この計画は、選択せられた地球軌道宇宙機、月面拠点又は操縦火星ミッションのために十分な動力を、かなり削減された容積で確保する。



計画は、クリティカルな原子炉発電システムのコンポーネントとサブシステムを開発する。これらは、(1) 長寿命の耐熱金属原子炉能力、(2) 燃料棒、(3) 高温制御システム、(4) 液体金属熱電磁気ポンプ、そして(5) 高効率で軽量の、熱電変換・ヒートパイプ熱排除システムを含む。

### 3. 「宇宙における人間」技術

宇宙における人間分野は、月、火星及び太陽系の他の惑星への安全で生産的な有人ミッションを確保するのに必要な技術と理解を提供する。

この分野の計画要素は、(1) 船外活動／船外活動服、(2) 人間能力、そして(3) 閉鎖循環生命維持である。これらの要素は、長期間宇宙ミッションにおける効果的動作と健康を可能にするのに必須の工学システムを提供するよう設計される。

#### 船外活動／船外活動服

船外活動／船外活動服技術は、長期間の高性能人間活動に必要な技術基盤を提供する。長寿命で保守の単純なシステムで、機動性と器用性が重要な技術要求である。

計画は、船外活動服コンポーネントとシステム、及び携帯型生命維持の概念とコンポーネントという2つの技術分野の開発に焦点を置く。宇宙服表層部分先端材料と環境対応措置が小型化されたコンポーネント及び改良された熱管理システムと共に開発される。

#### 人間行動

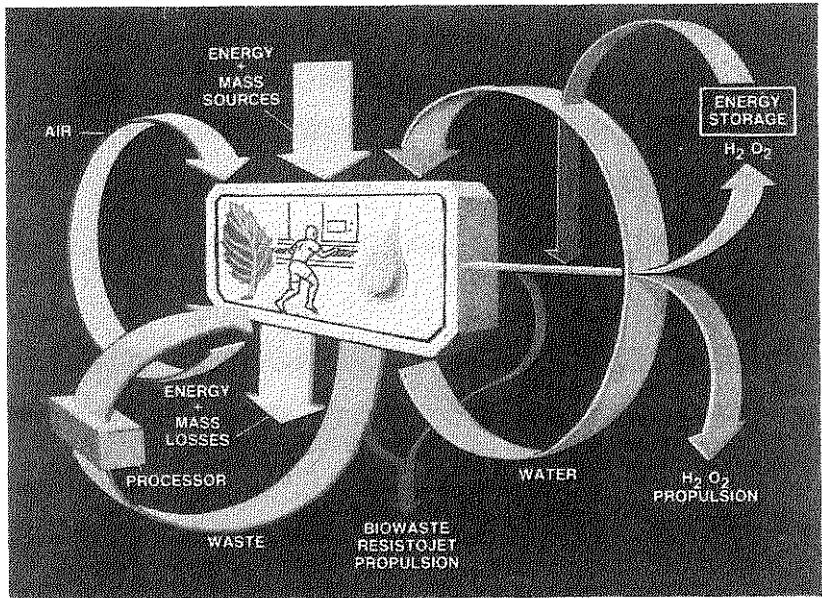
人間行動研究は、長期宇宙ミッション中及びその後の安全で生産的人間能力を保証する。物理的及び認知的作業における人間の能力と限界の研究が行われ、さらに人工重力システムのような必要技術が明確化される。

計画は、長期の閉じ込められた状態、不自然な重力へのさらし、そして不慣れなりスクとストレスの間の、人間の生理学的要求と適応変化の受容を助ける技術の研究開発に焦点を置く。

## 閉鎖循環生命維持

閉鎖循環生命維持は、長期有人宇宙運用での消費物資量を相当減らし、それにより補給コストを減らす技術を提供する。

計画は、化学的／物理的処理系と植物／生命系の両者の閉鎖循環生命維持シ



テム技術を開発し試験する。計画は2つのアプローチの最適な混合を定義し試験する。

## 4. 輸送系

輸送系の分野は、月、火星及び太陽系の他の惑星への輸送、そしてそこからの帰還のために、同時に信頼性あるコストエフェクティブな地球軌道運用のために必要なクリティカルな技術を提供する。

計画要素は、(1) 化学推進、(2) 貨物ロケット推進、(3) 高エネルギー・エアロプレーキ、(4) 自動着陸船、そして(5) 不具合の許容性高いシステムである。これらの要素は、地球軌道科学や太陽系の無人ロボット及び有人操縦探査を含めて、多くの考えられるミッションに必要な将来型宇宙輸送システムのために、コストとリスクの両方を減らして、クリティカルな必要とされる能力を提供するよう設計される。

## 化学推進

化学推進の研究は、月及び火星着陸船とともに、高性能の宇宙配備の移動ロケットのための推進技術の開発成功を保証する。

計画の焦点は、宇宙での維持と自動運用のできる高性能で、不具合許容度の高い液酸/液水エンジンのための有効な設計分析データベースの開発に置かれる。鍵となる技術問題は、高温燃焼器、高圧ターボ機構及びシステム状態自己診断・制御を含む。

#### 貨物ロケット推進

貨物ロケット推進の研究は、操縦火星ミッション及び外惑星ロボット探査ミッション支援に使用するために、非常に高性能な電氣的推進技術を開発する。

計画は、磁気プラズマ・ダイナミック (MPD) スラスターの開発、及び高出力レベルでのフィジビリティ確立に焦点を置く。鍵となる技術問題は、メガワット (1,000KW) 出力レベルで自己誘導磁場を生み出すMPD 陰極の寿命、及びそのための長期の性能試験を含む。

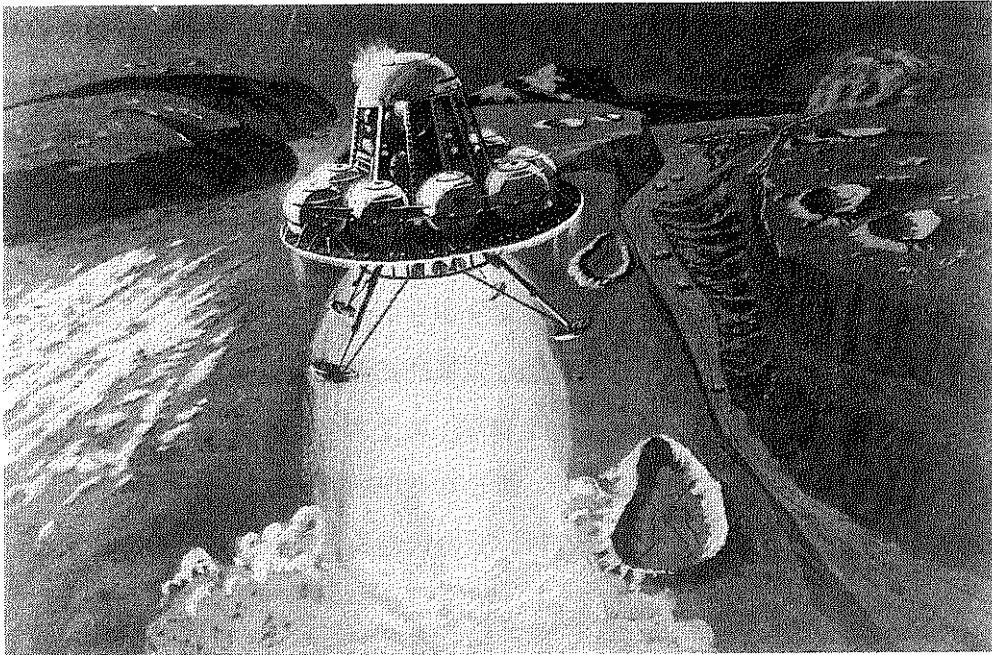
#### 高エネルギー・エアロブレーキ

高エネルギー・エアロブレーキの研究は、軌道での質量を大きく減らして、高エンタルピー/高速度再突入を完遂するのに必要な技術基盤を提供する。ブレーキ用搭載燃料の削減は、月面拠点と火星へのロボット及び有人操縦ミッション両者のための効率的輸送を可能にする。

計画は、最適な性能のエアロブレーキ・コンフィギュレーション及びコンポーネント技術開発に焦点を置く。熱保護システム用先端材料並びに不具合許容性と適応性の高い誘導、航法及び制御システムが開発される。

#### 自動着陸船

自動着陸船の研究は、様々な潜在的科学ミッションのために、時に危険な、地質学的に興味ある場所への安全な着陸を保証するのに必要な技術を提供する。これらの技術はまた、月面拠点用自動補給運用を支援し、月及び火星への有人操縦着陸運用のリスクを軽減する。



計画は、最終段階降下方法及び軌道アルゴリズムの開発、並びに誘導、航法、制御設計、ソフトウェア及びセンサーに焦点を置く。

#### 不具合に許容性高いシステム

不具合に許容性高いシステムの研究は、全体システム不具合許容性において劇的な改良を可能にし、同時に性能を改良するフォトニク技術とシステムアーキテクチャを開発する。大幅に改良された信頼性と性能は、地球軌道宇宙機、ロボット探査ミッション及び長期有人惑星探査を向上させる。

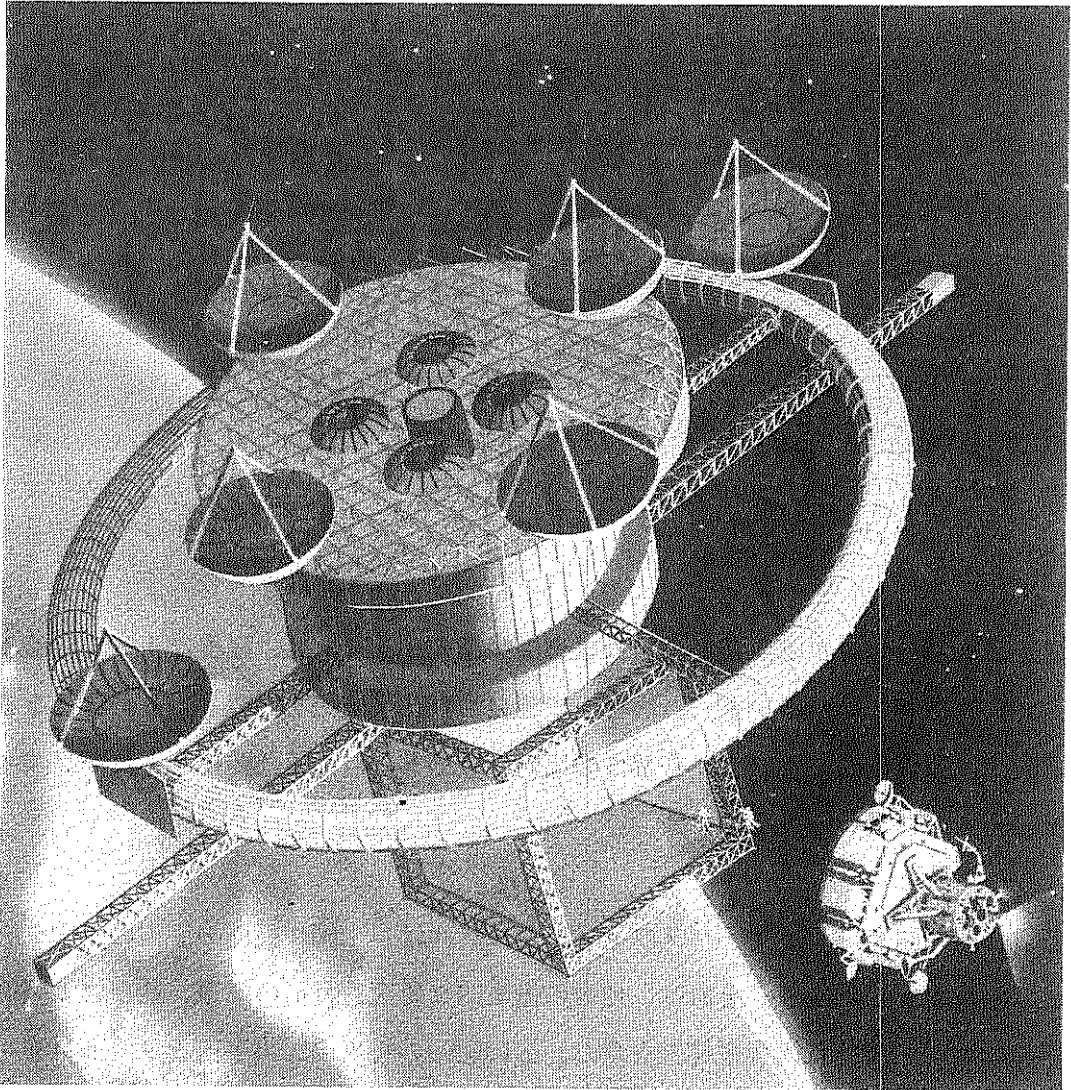
計画は、プロトタイプメモリー、入出力コンポーネント及び通信コンポーネント、更に長寿命で高信頼性のフォトニク・センサーを含む、フォトニク技術及びシステムの開発及びテストベッド評価に焦点を置く。

#### 5. ミッション応用

パスファインダー計画の下で開発された技術は、広い範囲の潜在的なNASAミッションを支援する。これらは、太陽系の無人ロボット探査、地球についての我々の理解を高めるためなどの地球軌道上の宇宙機、月面拠点、及び有人操縦惑星探査ミッションが含まれる。

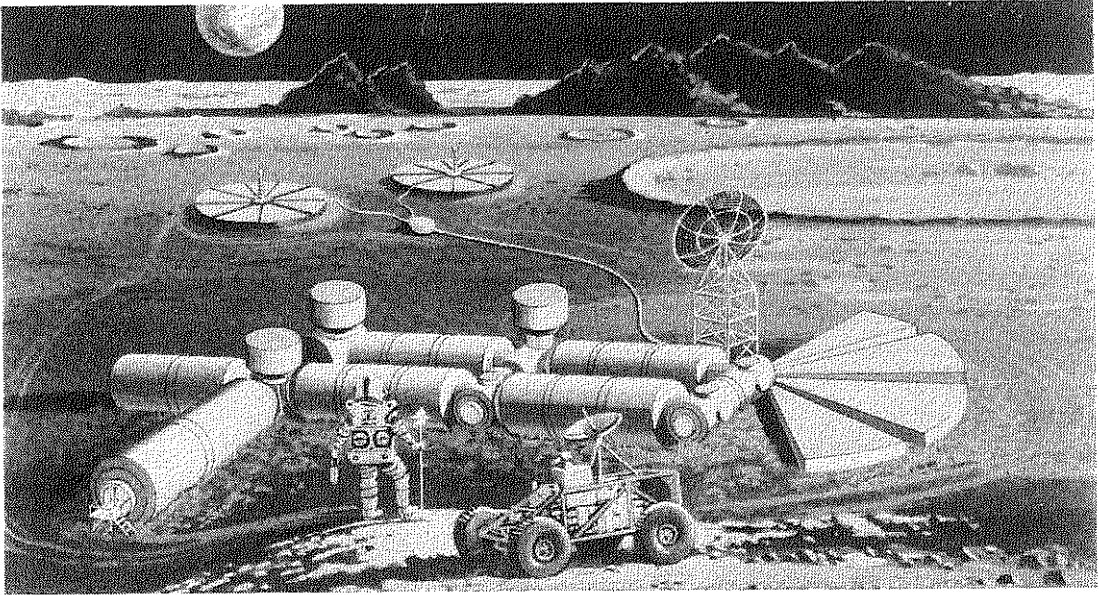
## 地球軌道

パスファインダー計画で開発された技術は、先端的な地球軌道運用を可能にする。将来型宇宙ステーション及び関連インフラストラクチャは、宇宙での組立・建設、自動ランデブー・ドッキング、極低温流体貯蔵技術、船外活動／船外活動服技術、及びミッション中継発進と運用を支援するために移動ロケット分野の多くの技術を用いることになる。



## 月運用

月拠点とは、化学推進、月面動力、宇宙原子力電源及び資源処理パイロットプラント技術を応用する。拠点は、バスマイnder計画の宇宙における人間分野からの技術に依存している。



## 惑星探査

例えば火星へのロボット及び有人操縦惑星探査ミッションは、程度によって変わるが、実質的にバスマイnder計画の下で開発された全技術を必要とする。鍵となる技術例は、探査技術、不具合に許容性の高いシステム、自動着陸船技術、及び高エネルギー・エアロブレーキを含む。

必須技術の開発によって、バスマイnder計画は、米国に長期の宇宙のリーダーシップの基礎を提供する。それは、地球の徹底的な研究、月への帰還、並びに太陽系の無人ロボット及び有人操縦探査を含む、広い範囲の将来の民事宇宙ミッションを可能にする。今は存在しない計画のための各種代替手段を提供し、宇宙における将来の成功を可能にさせる一方で、バスマイnder計画はまた、NASAと米国産業界と大学間の強力な連携を通して、米国技術を前端的に推し進める。



# 月面の資源探査ミッション

岩田勉

## 1. はじめに

月面上での無人の探査構想については、科学研究を目的とした月面観測プラットフォーム、ペネトレータ／着陸船など、及び月面基地建設を目的とした無人月面車（NASA等）その他、種々の構想が発表されている。ここでは、月資源の開発の観点から考えられる無人のミッションについて述べる。

## 2. 月資源の分析・評価

月を資源として見る場合、広い意味では太陰暦としての時計の役割、天体観測用のプラットフォームとしての役割等も資源ではあるが、ここでは狭い意味で考える。すなわち、鉱物資源としての利用を目的とする。この場合、月表面の物理化学的状況を局所的に観測し、分析／評価することが第一歩となる。

しかし利用の目的のためには、静的に表土の組成、構造を調べるだけでは不十分である。表土をどのように加工できるかが判明しなければ、資源利用の見通しは得られない。従って、加工可能性の試験が必要となる。これら試験は、サンプルを地球へ持ち帰ることによっても相当程度、解明できるが、持ち帰りのコストや条件の変化などを考えると、現地での試験の方がずっと有利な点が多い。アポロのサンプルは400Kg 足らずであり、十分な実験ができていない。以下は、持ち帰らないという前提で考える。

## 3. 無人活動

有人月面基地を建設してそこに資源研究室を設けることができれば理想的である。しかし現在は、有人月面基地の計画を評価するために、月資源の利用価値を知りたいのであるから、低コストで実行することに意義がある。従って無人の資源分析・試験装置を考えることになる。



技術的には二つの大きな課題が解決されなければならない。

第一には、全体重量の制限である。H-II ロケットにより月面に軟着陸させ得る重量は1トン未満である。これには下降用エンジン、タンク、予備燃料などを含む。従って各機器はできる限り軽量化しなければならない。

第二には、地球と月の距離384,400Km を電波通信が往復するのに約3秒を要することである。このため、高度のテレオペレーション又は半自律化の技術が必要となる。

#### 4. ミッションのモデル

月表面の固体物質の利用価値を調べるミッションとして以下のモデルを考える。

- (1) H-II ロケットで無人の探査機を月面に軟着陸させる。着陸場所は、地球側赤道付近とする。
- (2) 探査機は移動能力を持ち、平均時速1Km で平地を移動する。岩地、傾斜地を移動する能力も持つ。寿命5年全移動距離10,000Kmとする。
- (3) 表土を非接触センサー（画像センサー、磁気センサー等）で観察し、データを二次元画面に変換する。
- (4) 表土を接触センサーで観察する。
- (5) 表土を加熱、融解、気化し分光分析等を行い、成分、構造を調べる。また、加工実験を行う。
- (6) 表土を実験容器に搬入し、物理観測、化学処理実験等を行う。  
気密容器に入れ、加熱/水素還元法等により酸素を製造する実験を行う。
- (7) コアドリル等により、地下数mの堀削を行い、地下環境の測定、地下の物理化学構造を調べる。また各種堀削法の実験を行う。
- (8) 表土のガラス化等により、気密構造を作成する実験を行う。
- (9) 動植物の飼育栽培も考える。

#### 5. システム概念

以上のミッションモデルを実行するためには、次のようなシステムが必要と思わ

れる。(FIG. 1)

(1) 着陸用の推進系を持つ。使い捨ての中推進力軽量エンジンがよい。

着陸用の誘導制御系を持つ。遠隔操作用の画像センサーが必要。探査機が着陸機から分離できるようにすれば、重量が大幅に軽減できる。

(2) 探査機が移動するためには荒地用の低速走行機構が必要である。六輪車、自在サスペンション、無限軌道等の既存機構の適用、あるいは特別のロボット脚の開発が考えられる。動力は太陽電池とバッテリーの組み合わせで十分と思われる。

(3) 非接触センサーをマニピュレータの先に取り付け、自由に地面に近づけ得るようにする。

(4) 接触センサーをマニピュレータの先に取り付け、地面の任意の点に接触し得るようにする。接触センサーとしては、偏光顕微鏡、電子顕微鏡、X線回析装置などの機能を備えたもの、あるいは、表土に外力を加えて、反応を見るものなどが考えられる。

(5) マニピュレータの先に、高温点熱源を取り付け、表土の一点を $3000^{\circ}\text{K}$ 程度まで、任意の温度に加熱し得るようにする。熱源は、ヒータ線、マイクロ波ビーム、レーザービーム等が考えられる。この点熱源による表土物質の変化を観察するセンサーを備える。また表土物質の気化蒸気を分光分析、質量分析等で観測するセンサーを考える。

(6) スコップ状の道具で表土をすくい、実験容器に搬入できるようにする。実験容器の内部で、粉碎、攪拌、加熱、融解、冷却、内部状態観測ができるようにする。また内部に試薬、溶媒の投入ができるようにする。容器は必要に応じて、気密化が可能とし、高圧に耐えるものとする。また反応生成物を適当に搬出し、他の容器に導けるようにする。

(7) コアドリルを持ち、地下数mの坑内を堀削できるようにする。坑内へ各種センサーを挿入できるようにする。坑内において、坑壁の加熱加工/実験ができるようにする。坑径10cm程度が理想的と思われる。

(8) 表土を加熱/焼結して、これに金属膜等を付着させ、気密空間を得る実験が可能ないようにする。

(9) 軽量な閉鎖生態系を持つ。

## 6. 設計思想

このシステムの設計は、次のような考え方で進めることが適当と思われる。

- (1) 回収を考えないミッションであるから、使い捨ての利点を最大限活用する。
- (2) ただし、5年間の寿命のあいだ、多様な実験が行ない得るように、信頼性を高める。
- (3) 地球からの指令により、相当程度の自己修復、自己改修が可能なようにする。
- (4) 14日連続する夜間は、冬眠状態とする。

## 7. 終わりに

月資源を開発することを目標とすれば、無人で行い得る実験は、できるだけ早く、多く行っておくべきである。多分、月面での無人活動は、有人活動に比べてはるかに容易かつ安価に実行できる。その成果は、後の有人活動を実現するための貴重な知識を提供すると同時に、月面の利用価値を評価するために決定的な情報を地球へ送り返すだろう。

## 参考文献

- 1) 岩田：H-IIロケットによる月資源探査計画、宇宙先端 vol.3 no.3、1987
- 2) TK-SS2014 将来の宇宙活動モデルの研究 昭和61年度報告書、筑波宇宙センター、1987
- 3) 月探査ミッション計画書、月探査ワーキンググループ、宇宙科学研究所、1987
- 4) IWATA : ON LUNAR SELF-REPRODUCTIVE INFRASTRUCTURE、IAA-86-454、1986
- 5) 月・惑星探査技術の研究、航空宇宙技術研究所/宇宙開発事業団共同研究、1980

(本稿は第1回宇宙用人工知能・ロボット・オートメーションシンポジウム、1987年11月に発表したものを同シンポジウム事務局の了解を得て転載した。：編集人)

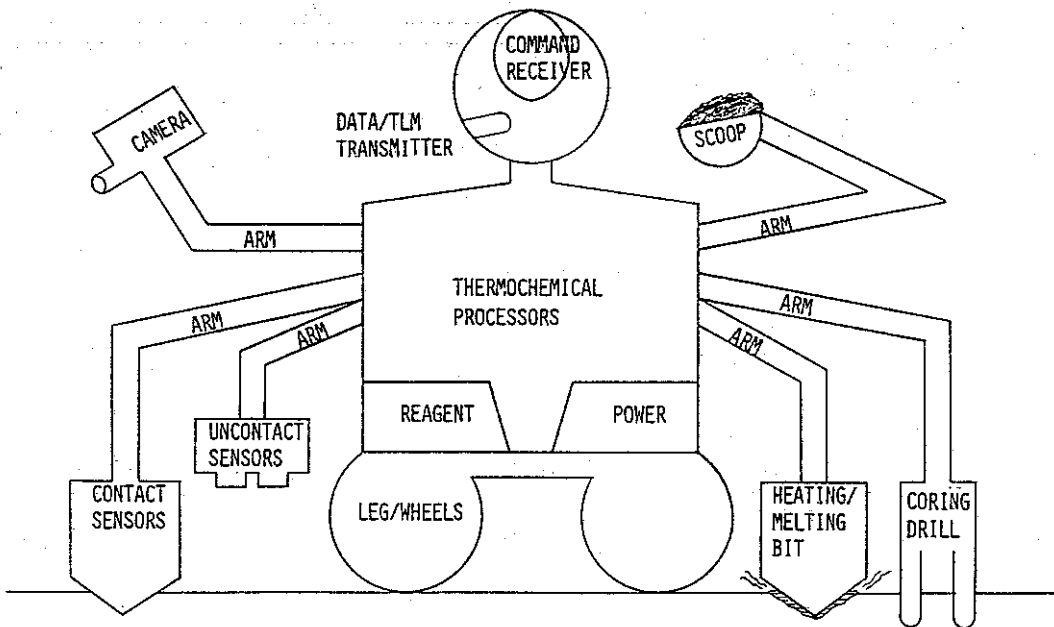


FIG.1. LUNAR EXPLORATION ROBOT

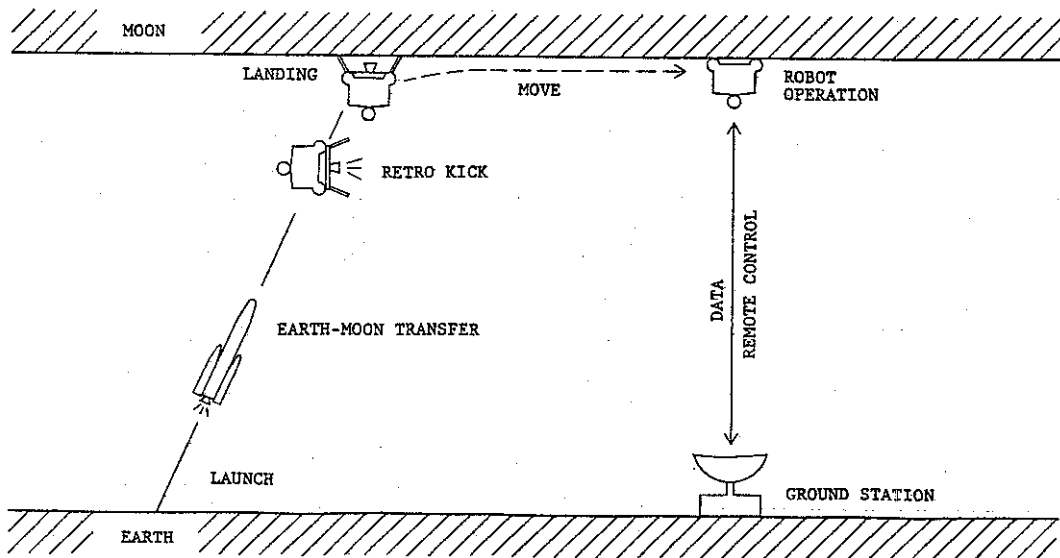


FIG.2 LUNAR EXPLORATION SYSTEM CONCEPT

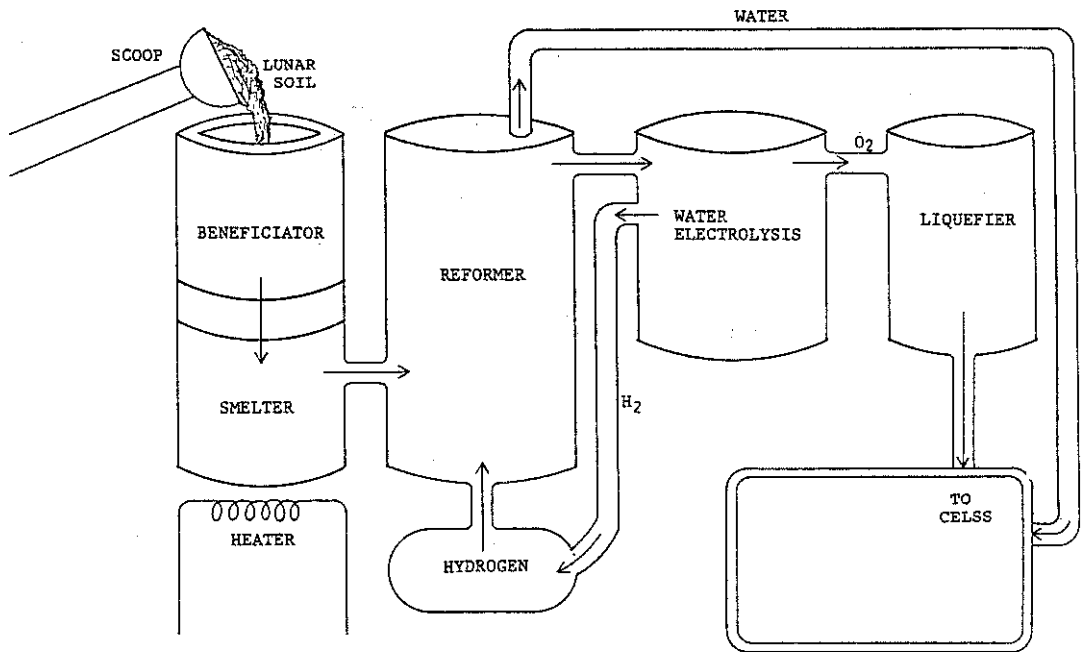


FIG.3 OXYGEN PRODUCTION PROCESSOR

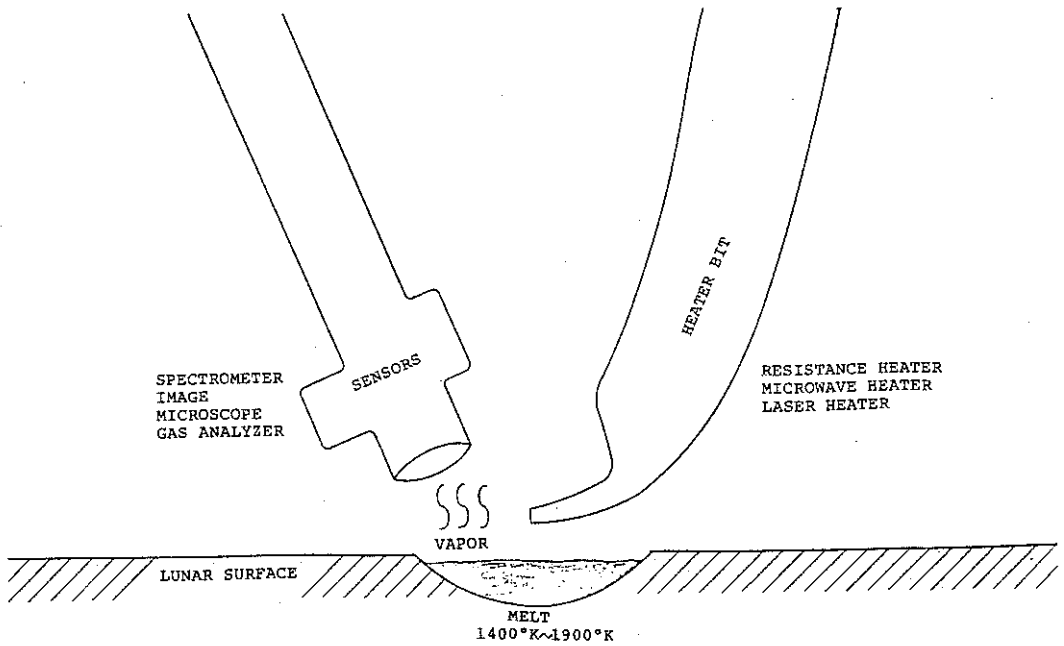


FIG.4 MELT-AND-SEE CONCEPT

## 有人宇宙システムの間人・機械系設計に考慮すべき人的特性

### I. まえがき

人間は、外界からの情報あるいは身体内部の情報を、感覚器官を通じて感知している。感覚器官において、視覚、聴覚、嗅覚、味覚及び触覚はいわゆる五感といわれる。今回は、これら五感の中から、視覚について人間工学的な観点から記述した。

### II. 視覚のしくみ

物体から発せられた光あるいは反射した光は、まず初めに角膜に衝突する。角膜の表面において光の屈折が起こり、像の焦点合わせの大部分が行われる。次に、眼房をとおり、瞳孔を通過する。瞳孔は、眼に入る光の量を調節し、光の量が多いときは、瞳孔は小さくなり眼を防御する。逆に、光の量が少ない場合は、より多くの光を得るために瞳孔は大きくなる。瞳孔を通過した光は、水晶体にいたる。水晶体は、その厚さを変化させて焦点合わせを行う。水晶体を通過した光は、最後に網膜上に到達し、物体の像が結ばれる。網膜上に写し出された像は、光信号から電気信号に変換される。これらの電気信号は、視神経を通じて頭部の後ろにある大脳の後頭葉に伝達され、高次の情報処理が行われる。ここで初めて像のイメージが知覚され、それが何であるかを認識できるのである (Fig.1参照)。

### III. 錐体と桿体

網膜は、実際には膜ではない。それぞれ個々に、光エネルギーに感応する一つ一つの視細胞から構成されている。視細胞には桿体と錐体の2種類があり、それぞれ機能が異なる。

錐体は網膜上の中心に多く存在し、視力が最もよいところである。また、色を感知するのはこの錐体である。

桿体は、網膜の中心から約20度離れたところに多く存在する。桿体は、錐体では感知することができない弱い光に高い感度を有する。

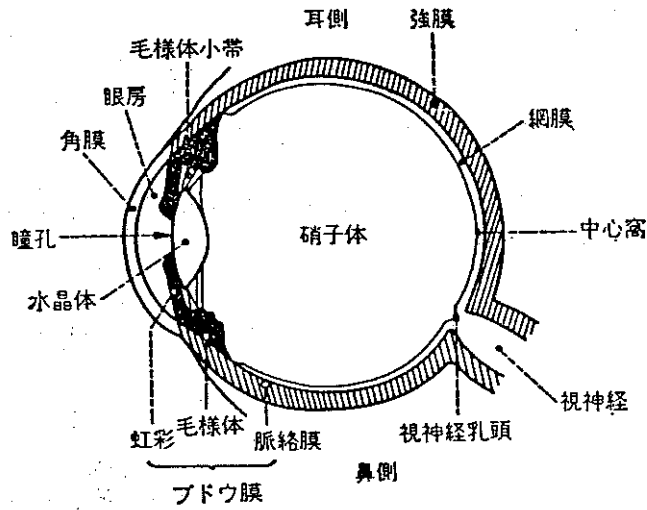


Fig.1 眼球の水平断面図 (丸尾, 1973)

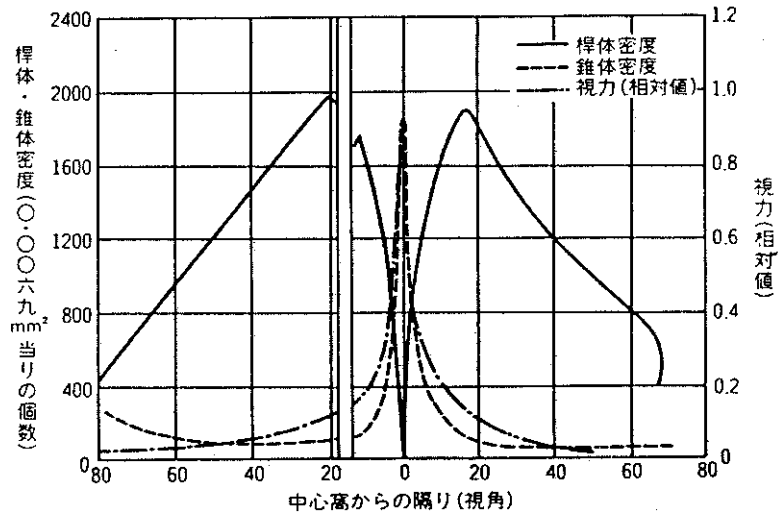


Fig.2 網膜上の位置と錐体と桿体の密度と視力 (Graham, 1965)

Fig. 2に示したように、人間の視力は、錐体が多く存在する網膜の中心が最大となり、周辺に行くにしたがって視力は低下する。したがって、ワークステーションのような人間・機械系インタフェースを設計する場合、重要な機器等は、搭乗員が中心視でとらえられるようなレイアウトにする必要がある。

例外もある。暗い部屋で弱い光を見る場合、それを中心視でとらえようとする、かえって見えない。それは、弱い光に感度が高い桿体が、網膜の中心には存在しないからである。この場合、視線をずらせて周辺視でとらえた方がよく見える。

#### IV. 暗順応と明順応

映画館に入ったとき、初めはあまりよく見えないが、時間がたつにつれてよく見えるようになってくる。この過程を暗順応という。明るい光を見た後、暗い状況に完全に順応し、周囲が明瞭に見えるようになるまで、Fig. 3に示したように、約30分を要する。

宇宙環境においては、搭乗員は、地球上に比べてかなり強い光にさらされる。宇宙船の窓から明るい外界を見た後、眼を再び船内に移しても、すぐには眼の機能は正常には働かない。したがって、有人宇宙システムの間・機械系を設計する場合、この暗順応を考慮しなければならない。特に、EVA活動では非常に重要な要因である。太陽の光が当たっているところから、急に太陽の陰で作業しなければならなくなった場合、避けて通れない問題となる。

逆に、暗い場所から明るい場所に移った場合、眼が明るさに慣れてよく見えるようになるまでの過程を、明順応という。この明順応は、数分もすれば眼の機能が完全に回復する。したがって、暗順応に比べて、それほど深刻な問題とはならない。

#### V. 視野

視野とは、眼で見ることが出来る範囲をいう。頭を固定して眼だけを動かした場合と、頭を自由に動かすことができる場合の視野をFig. 4に示した。

有人宇宙システムの間・機械系を設計する場合、単純に見える範囲を考慮しただけでは最適設計とはいえない。前項で述べたように、中心視と周辺視では視力が異なる。視力測定で「1.0」と判定された人でも、中心視から40度ずれば視力は0.6に低



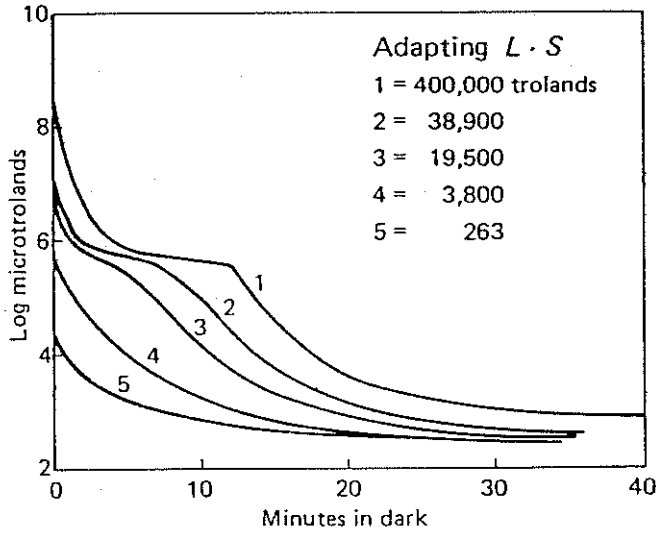
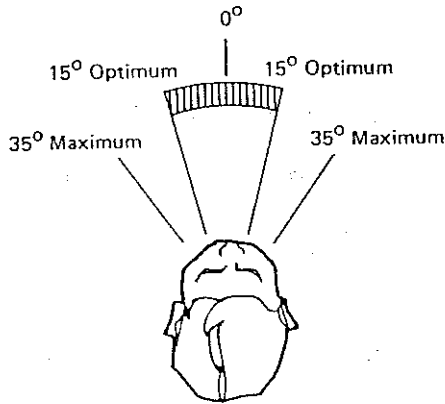
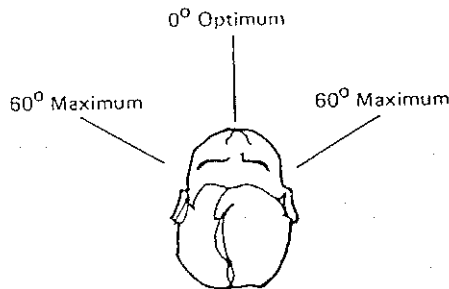
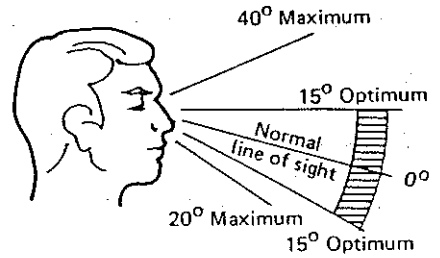


Fig. 3 Dark Adaptation Thresholds



Eye Movement Range



Head Movement Range

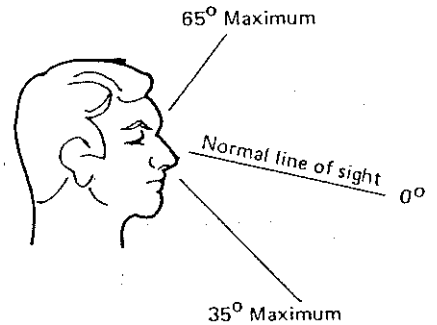


Fig. 4 Eye and Head Movement Ranges

下する。設計には、搭乗員の作業姿勢、作業位置等も考慮する必要がある。例えば、Fig.5に示したように、窓を設計する場合、窓枠の大きさ、搭乗員と窓との位置関係等も考慮する必要がある。

## VI. 色の知覚

色を知覚するのは錐体の働きによる。桿体には色を知覚する機能はない。したがって、色の知覚は中心視で行われる。人間には、約700万の錐体と約一億の桿体があるといわれている。ちなみに、ネズミ、フクロウ、ヤモリ等は、桿体しかなく、カメ、トカゲ、ヘビ等には錐体しかない。

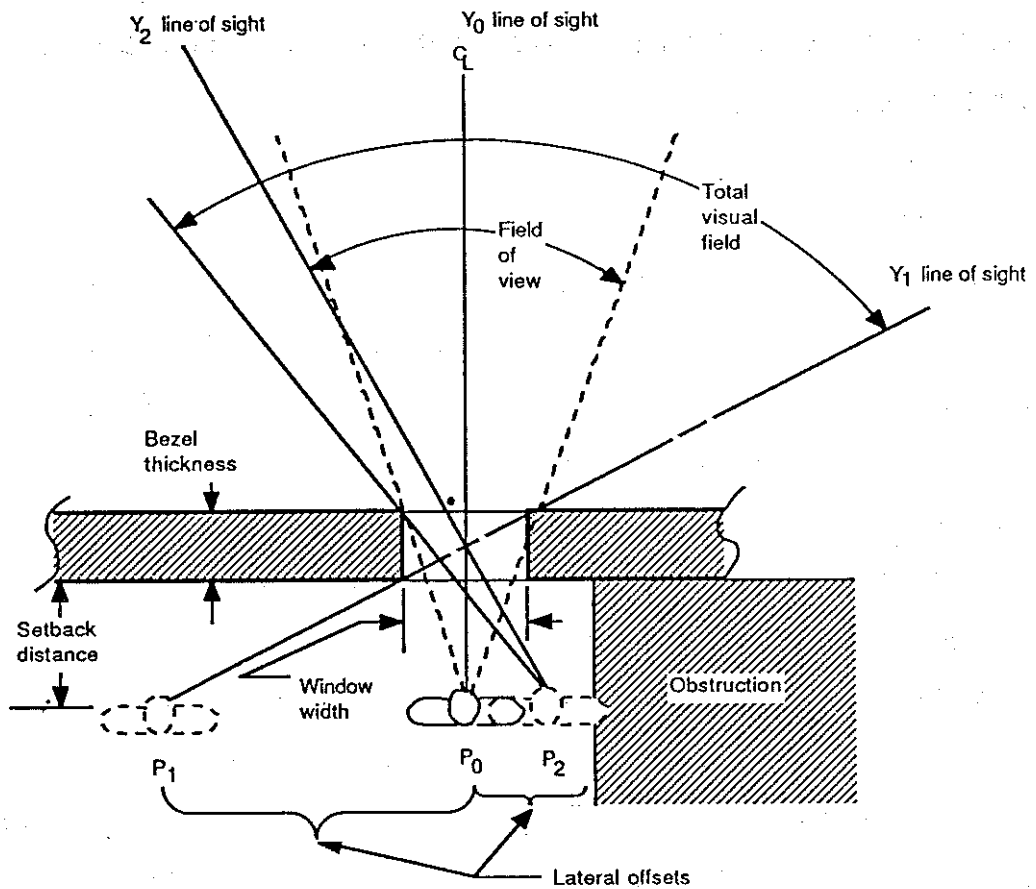
色の知覚は、人間が感じ取った主観的な体験である。実際に、青、赤、黄色等の色が存在するのではない。私たちが色として見ているのは、波長光線である。それを色として感じ取るのは、あくまでも人間側の主観なのである。

人間が感知できる波長光線は、約400-800nm（ナノメートル）の範囲である。これを可視光線といい、プリズムによって分離すると、長波長から短波長へときれいなスペクトルの色直線に並べることができる。このスペクトルの色直線において、短波長の端400nm付近は、すみれ色または青紫として知覚され、長波長の端800nm付近は、赤として知覚される。また、人間は、色の変化にかなり高い感受性を有する。非常に似通った色であっても、波長が440nm、480nm、580nmあたりであれば、波長の差が1-2nmもあれば色を区別できる。

色がどのように見えるかは、照明、コントラスト、背景及び色の持つイメージ等、さまざまな要因が関連してくる。

例えば、赤や黄色は進出色といわれ、他の色に比べて浮き出て見え、より近く感じる。逆に、紫や青は引っ込んで見え、より遠く感じる。警報等に色を用いる場合、これらの特性を考慮してうまく組み合わせれば、認識され易い情報を搭乗員に提示することができる。また、宇宙船内の色を何色にするかによって、搭乗員のパフォーマンスに影響を及ぼす場合がある。黄色や赤等の暖色系の色は、人間の感情を高ぶらせる効果があり、青や灰色等の冷色系は、人間の感情を落ち着かせるといわれている。

色も利用する場合は、慎重に考慮すべきである。



Dimension	Factors affecting dimension
Bezel thickness } Window width }	• Window hardware design
Set-back distance	• Body dimensions of viewer • Size of workstation console or other equipment around window
Lateral offset	• Number of viewers • Obstructions around window area • Viewing requirements of task (i.e., target acquisition time)

Fig. 5 Calculation of Visual Angle From Window

## VII. 空間識

空間識とは、空間における自分の姿勢や方向を感知することである。地上で生活している限り、自分の姿勢や方向など特別意識しなくても生活できる。しかし、航空機や船、さらに宇宙船などに乗ると、たちどころにこの空間識の重要性に気づかされる。

空間識は、眼からの視覚情報、足の裏などの圧感覚及び筋肉、腱、関節の伸縮からの体性感覚情報、さらに三半規管、耳石等の前庭器官からの平行感覚情報により感知される。これらのうち、無重量環境では、平行感覚情報が不足あるいはまったくなくなってしまう。平行感覚情報の受容器官である耳石は、重力と直線加速度を感知する器官である。耳石は、 $0.01G$ 以上の加速度であれば感知することができるといわれる。

一方、三半規管は、角加速度を感知する器官である。 $2.5^\circ/\text{SEC}^2$ 以上の加速度を感知できる (Fig.6参照)。

無重量環境においては、外部から何らかの外力が加わらなければ、これらの器官に信号が入力されない。耳石は地球上では常に重力信号を感知しているのに、無重量環境では、それらの信号が脳に伝わらない。この矛盾が空間識を狂わせ、宇宙酔いを誘発するといわれている。

無重量環境では、搭乗員は空間識の手がかりとして、その多くを視覚情報に依存している。そこで必要とされるのは、宇宙船内の垂直方向、すなわち、上下の手がかりである。無重量環境では、上下の区別はない。搭乗員は、どのような作業姿勢でもとることができる。また、空中でぐるぐる回ったり、逆さになったり、地球上ではできないような運動を行うことができる。だからといって宇宙船内を、全方向性の作業空間に設計していいわけではない。このような設計をすれば、視覚情報が混乱して搭乗員の空間識を狂わせ、宇宙酔いを誘発する。無重量環境といえども、上下方向は明確にしなければならない。現在では、宇宙船内の床、壁、天井を色分けし、上下方向の視覚的な手がかりを与える方法が取られている。その一例をTab.1に示した。また、ワークステーション等も、Fig.7に示したように、この上下方向と一致させる必要がある。

## VIII. 距離判断

人間は、距離や物体の奥行きをどのように判断しているのだろうか。網膜上に

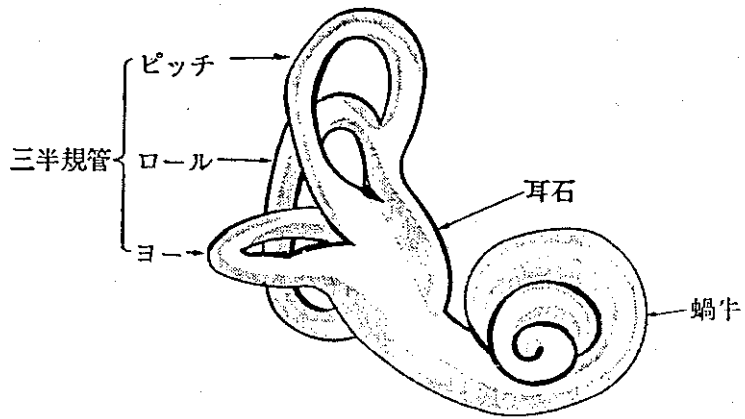
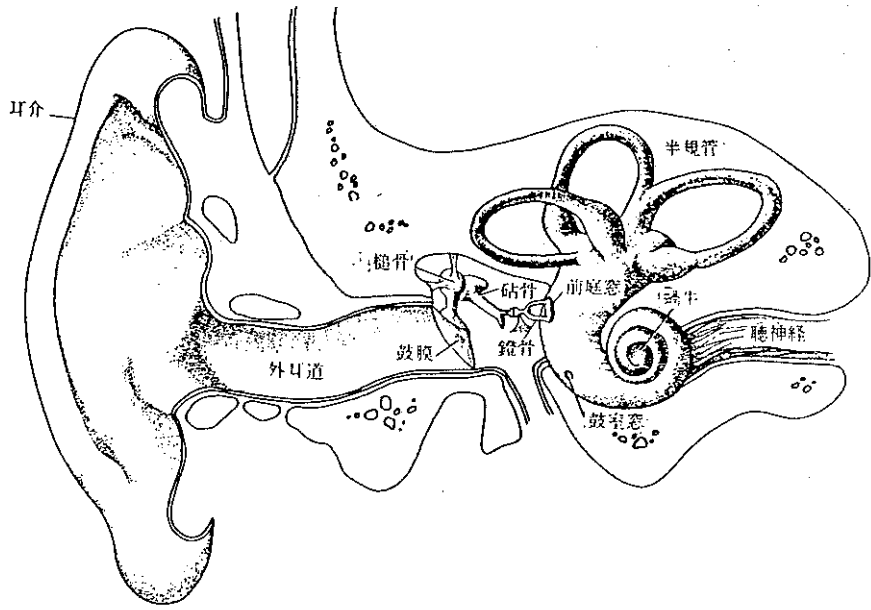


Fig.6 聴覚の構造

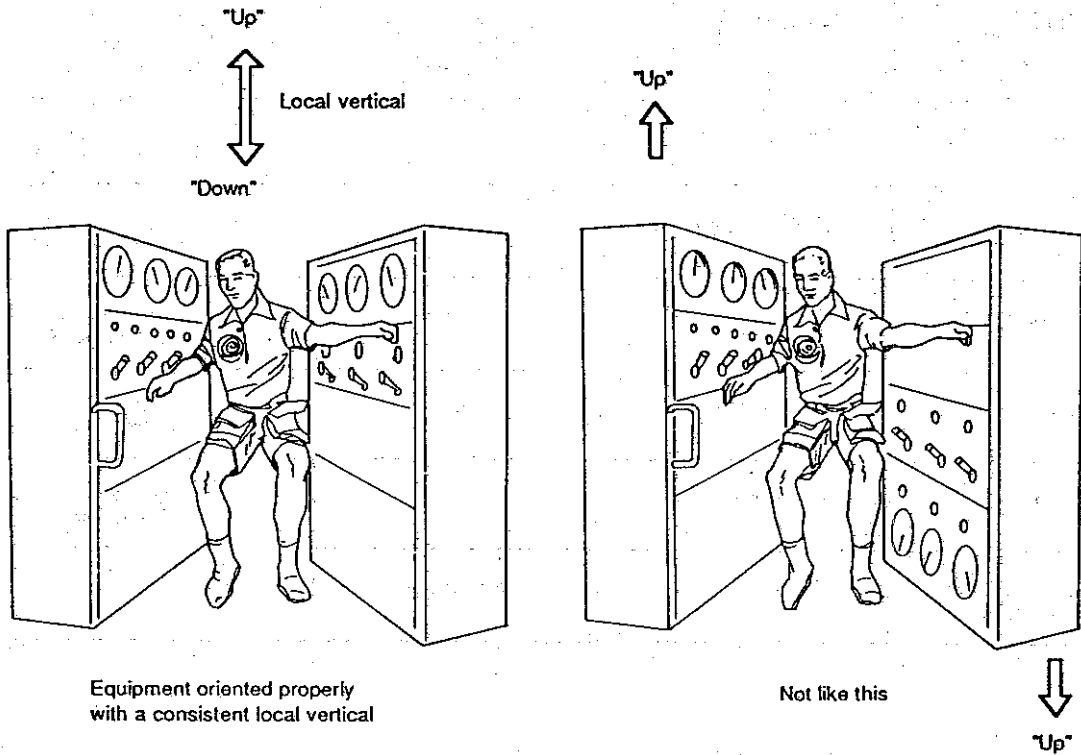


Fig. 7 Equipment Shall Have The Same Orientation Within a Workstation or Activity Center

Tab. 1 Spacecraft Orientation Coding Lights

NASA-STD-3000

Color	Vehicle location	Luminous intensity * candella (candlepower)	Chromaticity (CIE chromaticity diagram coordinates)
Aviation red	Port (left) side	2.5 (0.2)	Y = not greater than 0.330 X = not less than 0.650
Aviation green	Starboard (right) side	6.3 (0.5)	Y = not less than 0.390 X = not greater than 0.270
Aviation yellow	Bottom	2.5 (0.2)	Y = not less than 0.380 X = not greater than 0.630
Aviation white	Aft (preferred)	2.5 (0.2)	Y = 0.300 to 0.400 X = 0.300 to 0.400
Aviation blue	Aft (not preferred)	6.3 (0.5)	Y = not greater than 0.200 X = not greater than 0.245
Dual aviation white/ aviation yellow	Forward	See above	See above

写し出された像は平面である。それを人間は三次元として解釈している。その理由として、さまざまな理由が上げられる。

生理的な理由として上げられるのが、次の三つである。

- 1) 眼の調節作用：眼が像を正しく網膜上に結ぼうとして水晶体の厚さを変化させる。
- 2) 輻輳作用：近くの物を見ると、両眼が内側に回転する。
- 3) 両眼視差：両眼に写る像が、左右の眼で異なる。

経験的理由としては、次の五つを上げることができる。

- 1) 見え方の大きさ：大きく、鮮明に見えるものは近く、小さく、ぼやけて見えるものは遠くに感じられる。
- 2) 陰影：明るい部分と陰の部分の関係が立体感を生じさせる。
- 3) 明瞭度：色彩や輪郭が鮮明なものは近くに感じられる。
- 4) 重なりあい：重なって一部かくれて見える場合、近くのは遠くのを隠して見える。
- 5) 遠近法の見え方：平行線は、遠くに行くにしたがって接近して見える。

宇宙環境では、搭乗員の距離判断に狂いを生じ易くなる。それは、先に述べた経験の手がかりが地球上の見え方とは異なること、また、距離判断に必要な手がかりが少ないためである。具体的には、第一に、宇宙環境では、大気中に微粒子及びガスが地球に比べて少ないため、光の拡散があまりないこと。第二に、遠くにある対象は、地球上よりも鮮明に見えるし、コントラストも高いこと。第三に、遠近法の手がかりが少ないこと。第四に、基準となるレファレンスが得られにくいこと等が距離判断を狂わす原因として考えられる。

## IX. 視覚と加速度

加速度は、その大きさと作用方向及び作用時間が相互に関連している。大きな加速度でも作用時間が短ければ、ある程度許容でき、搭乗員のパフォーマンスへの影響は少ない。逆に、小さな加速度でも作用時間が長くなれば、搭乗員のパフォーマンスへの影響を無視できなくなる。

加速度の作用方向を次のように定義する。



Fig. 8に示したように、搭乗員の頭部から足にかけての上下方向において、頭部から足に向かって作用する場合を $+G_z$ 、その逆を、 $-G_z$ とする。腹部から背部にかけての前後方向において、腹部から背部に向かって作用する場合を $+G_x$ 、その逆を、 $-G_x$ とする。身体側面の左右方向において、右側から左側に向かって作用する場合を $+G_y$ 、その逆を $-G_y$ とする。

#### (1) $+G_z$

$+G_z$ において、3-4Gの加速度が搭乗員に作用すると、約3-4秒後視力が低下し、周辺が見えにくくなる。そして、しだいに眼の前が暗くなる。さらにGが加わり、4.5-6Gになると、視機能が著しく低下し、約5秒後ブラックアウト、すなわち、眼の前が真っ暗になる。

このブラックアウト現象が生じるのは、 $+G_z$ の加速度により、血液が上半身に流れにくくなるためである。加速度が大きくなるにつれて、眼球に血液が行きにくくなる。そのため、網膜の酸素が欠乏し、網膜機能が低下する。さらに加速度が大きくなれば、眼球にまったく血液が行かなくなり、網膜の機能がまったく働かなくなる。その結果、眼の前が真っ暗になる。

#### (2) $-G_z$

$-G_z$ において、2-3Gの加速度が搭乗員に作用すると、約5秒後、視機能が低下し、周辺が見えにくくなる。そして、眼の前が赤くなってくる。また、眼の調節機能が低下し、焦点合わせなどの調節に時間がかかるようになる。さらに加速度が加われば、眼の前がかすんだり、二重に見えたりする。そして眼の前が真っ赤になる、レッドアウトという現象にいたる。

このレッドアウト現象が生じるのは、 $-G_z$ の加速度が加わることにより血液が上半身に集まり、下半身に行きにくくなるからである。加速度が大きくなるにしたがって上半身に多量の血液が流れ、それが網膜にも流れ込み、眼の前が真っ赤になるのである。

#### (3) $+G_x$

$+G_x$ において、3-6Gの加速度が加わると、視機能が低下し、周辺が見えにく

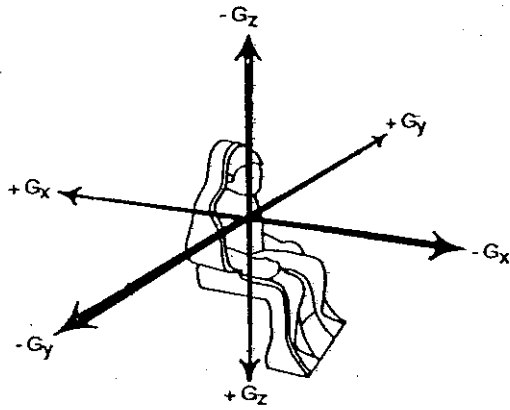


Fig. 8 Acceleration Environment Coordinate System Used in MSIS

Tab. 2 Body-Part Vibration Resonant Frequency Region

Body component	Resonant frequency (Hz)
Head	20 - 30
Chest wall	60
Abdominal mass	4 - 8
Spinal column	8
Main torso	3 - 5
Whole body (sitting)	5 - 6
Eye ball	40 - 60
Whole body (transverse)	2
Hip, standing	4
Shoulder, standing	4 - 6
Shoulder, seated	4
Pelvic area, semi-supine	8
Abdominal viscera	3 - 3.5
Abdominal wall	5 - 8
Anterior chest	7 - 11
Thorax	3.5
Thoraco-abdominal viscera (semi-supine)	7 - 8
Shoulder/head, transverse rib	2 - 3
Hip, sitting	1.5
Head, sitting	2 - 8
Hand	1 - 3
Hand	30 - 40
Foot, seated man	>10
Eardrum	1000
Head/shoulder, seated	4 - 5
Head/shoulder, standing	5 & 12
Whole body, standing erect	6 & 11 - 12
Whole body, standing relaxed	4 - 5
Limb motion	3 - 4

くなる。6-9Gになると、さらに視野が狭まり、眼の前がかすんで見える。また、焦点も合わせにくくなる。9-12Gになると、さらに周辺視が悪くなり、涙もでてくる。+15G以上になるとまったく見えなくなる。

#### (4) $-G_x$

$-G_x$ の加速度による視機能への影響は、 $-G_z$ とほぼ同じである。

#### (5) $+/-G_y$

この加速度については、今のところデータ不足である。

なお、人間は、 $+G_x$ 方向の加速度に最も耐性がある。ロケットの打ち上げには、搭乗員の $+G_x$ 方向に最大加速度がかかるように設計されている。打上げ時に、搭乗員が身体の前を空に向け、背を地上に向けて操縦席に座っているのはこのためである。

### X. 振動

振動が、視覚に与える影響について記述する。軌道上ではあまり問題とはならないが、打上げ時及び帰還時には大きな問題となる。

Tab.2に示したように、眼の共振振動数は、40-60Hzである。したがって、この振動が生じると、視覚系の機能低下は著しい。振動の影響は、搭乗員が振動している方が、対象が振動しているよりもその影響は著しい。

#### X I. 閃光

宇宙環境において、  
眼の奥に閃光を感じた搭乗員が多数いる。何等外部からの刺激無しにである。その原因は、宇宙線、重粒子放射線が搭乗員の頭に当たって、神経を刺激するためといわれている。

#### X II. あとがき

今回は、人間の感覚器官のうち、視覚について、その機能を説明するとともに、有人宇宙システムの人間・機械系を設計するにあたっての主な要因について記述した。次回は、聴覚とその他の感覚について記述することにする。

宇宙開発事業団 宇宙基地推進室 山口孝夫

#### 参 考 文 献

- 1) MAN-SYSTEM INTEGRATION STANDARDS. NASA-STD-3000 VOLUME I. 1987.
- 2) 人間工学：林喜男 編、日本規格協会、1981.
- 3) 飛行とこころ：航空心理学入門、黒田勲 監修、鳳文書林、1978.
- 4) 人間・機械系システムの設計：林喜男 大川雅司、井口雅一 編、人間と技術社、1971.
- 5) 情報処理心理学入門 I - 感覚と知覚 -：中溝幸夫、箱田裕司、近藤倫明 共約、サイエンス社、1983.
- 6) 飛行とからだ - 航空医学入門 -：池上晴夫 編、鳳文書林、1973.
- 7) 生理心理学：岩原信九郎、星和書店、1981.
- 8) 実験心理学：大山正 編、東京大学出版会、1984.
- 9) スピードと運転の科学 - マン・マシン・システムの心理学 -：井坂清、啓学出版、1981.
- 10) 心理学の理解：木村楨司、宇留野藤雄、岡村浩志、清水敦彦、福村出版、1969

## 会誌編集方針

1. 『宇宙先端』は宇宙先端活動研究会の会誌で、年6回発行される。
2. 論文の内容は、全て著者の責任とする。
3. 投稿資格：原則として本会会員に限る。
4. 原稿送付：投稿する会員は、A4版横書(38×29)で、そのまま版下となるような原稿及びコピー1部を、東京都港区浜松町2丁目4番1号、世界貿易センタービル内郵便局私書箱第165号、宇宙先端活動研究会世話人兼編集人 岩田勉宛送付する。原稿は返却しない。
5. 論文は未発表の原著論文に限る。ただし、他に発表したものの要約、解説等は歓迎する。掲載論文に対する質疑、意見、提案等、誌上討論は大いに歓迎する。
6. A4で20ページを超えるものは掲載しないことがある。宣伝、中傷その他本会の趣旨から極端に外れる投稿は掲載できない。編集人は会誌の整合のため、著者に改稿を求めることがある。

### \*\*\*編集後記\*\*\*

桜の開花と雪模様の天気が奇妙なコントラストを醸し出しています。自然のきまぐれもまた趣きのあるものです。こういう風景を見ると、人間、特に一人の人間の想像力の限界に思いが及びます。奇妙な組み合わせ、その中に新しい発見、創造の糸口を見い出すことができます。どんなに柔軟な考えの人でも、一人で考えを巡らせば単調のワナに陥ってしまいがちです。

最近、宇宙先端への投稿者の色合が偏っている気がしますが、桜の花と雪のコントラストのように、宇宙関係者、特に技術者ばかりでなく広く他の分野の人々の入会と投稿を願っています。法律、経済、文学、歴史等々様々の立場からの意見が本誌の中で奇妙なコントラストを生み出し、新たな発想の芽を育むようになることを願っています(長)。

宇宙先端	第4巻 第2号	頒価1000円
昭和63年3月15日発行		編集人 岩田勉
発行 宇宙先端活動研究会		
東京都港区浜松町	世界貿易センタービル内郵便局私書箱第165号	

無断複写、転載を禁ずる。

年会費：3,000円(1987年6月～1988年5月)  
会誌 無料(1987年7月号～1988年5月号)  
なお、会費は主として会誌発行にあてる。

振込先：振込口座(郵便) No. 2-21144  
宇宙先端活動研究会 宛