

## 無重力に起因する宇宙機の不具合

独立行政法人 産業技術総合研究所 岩田敏彰

### 1. はじめに

人工衛星をはじめとする宇宙機の不具合は様々な要因によって起こる。不具合の生じる主な背景としては、無重力、真空、太陽活動（放射線）、隕石などのような周囲の環境、放射線帯、食（温度の変化）のような軌道によって変動するがミッションによっては避けがたいもの、デブリ、設計ミスなどのような人間活動に起因するものなどが考えられる。これらの背景により生じた様々な要因により、宇宙機の様々な部分が影響を受ける。これまでの宇宙機の故障事例の報告は、公開されているものでも断片的であり、数も多くはないが、本稿ではその中から無重力環境に起因すると思われる不具合について紹介する。無重力による不具合は、地上での試験が困難なため、なかなか予想することが難しく、対策も取りにくくなっている。無人機の場合、不具合の原因の推定については、実際の衛星を見て直接確認できないため、様々なセンサデータ（テレメトリ）や状況から判断されたものであることを断っておく。

### 2. 無重力によって生じる不具合

これまで報告されている無重力によって生じる不具合は、(1)粒子の浮遊に起因するもの、(2)材料に重力下でかかっていたストレスが緩和することによって生じるもの、(3)重力下では微小で発現しなかった力学的な効果によるもの、(4)無重力下での特殊な流体現象に分類できる。ここでは、それぞれの原因で生じた事例について紹介する。一般に、地上において吊り下げ等の無重力試験が行われるのは太陽電池パドル、ブーム、アンテナなどの展開機構であるが、以下の事例からその他の部分においても思わぬ不具合が起こっていることがわかる。

#### 2.1 浮遊に起因する不具合

事例：地球資源衛星 1 号（JERS-1）短波長赤外放射計（SWIR）の冷却機不動作<sup>1)</sup>

地球資源衛星 1 号（JERS-1）は、能動型観測技術の確立を図るとともに、資源探査のほか、国土調査、農林漁業、環境保全、防災等の観測を行うことを目的としたもので、1992年 2 月 11 日に H-II ロケットで種子島から打ち上げられた。衛星の外観を図 1 に示す。

短波長赤外放射計（SWIR）は電荷結合素子（CCD）により地上からの太陽反射光のうち、短波長赤外域を観測し、地表の岩石や鉱物等の鑑別を行うための光学センサである。赤外線を観測するため、冷却器で CCD を 80K に冷却し、熱雑音を抑える必要がある。

1993 年 12 月 3 日以降、SWIR を冷却する冷却器が動作せず、冷却器の消費電力が規定値を越えて過大な電流が流れ、各部の温度が異常に高くなっていることが判明した。これは冷却器を駆動するモータが機械的に回転できなくなっている状態と考えられ、異常部位はモータ自身かモータにつながる減速機、クランク部、圧縮・膨張ピストン部であると推定された。原因としてはコンロッド軸受に異物が混入し、モータがロックされ、冷却器が動作停止したものと推定された。異物が混入した原因は、以下のように推定された。1) 減速器ギアが磨耗した。2) 磨耗片がグリースに混入して固まりとなり、運転振動により無重力中で浮遊した。3) この固まりがクランク室に入り、コンロッド軸受に入り込んだ。4) 軸受が破損し、モータがロックされた。SWIR 全体を図 2 に示す。また、冷却器の内部構造を図 3 に示す。さらに、冷却器の詳細な内部構造を図 4 に示す。

地上実験では、磨耗片等が冷却器の底に付着しているのが確認されたが、浮遊しないため異常は発生しなかった。

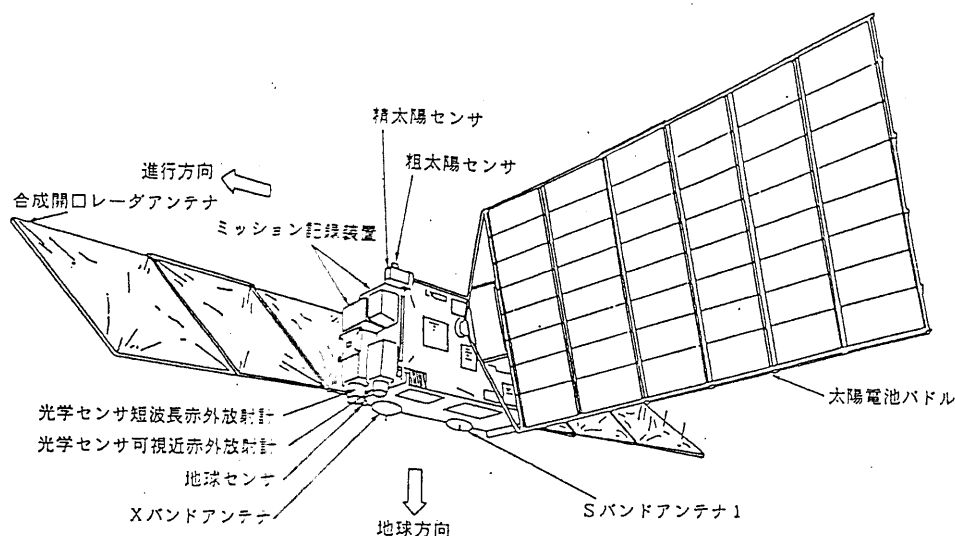


図 1 JERS-1 の概観

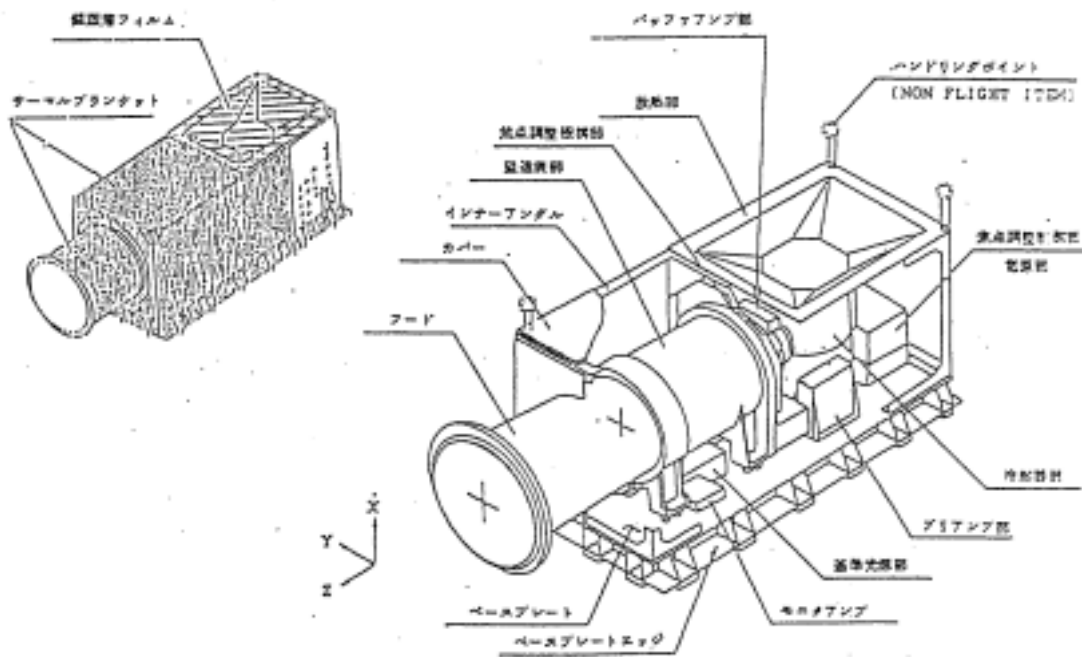


図2 SWIRの全体図

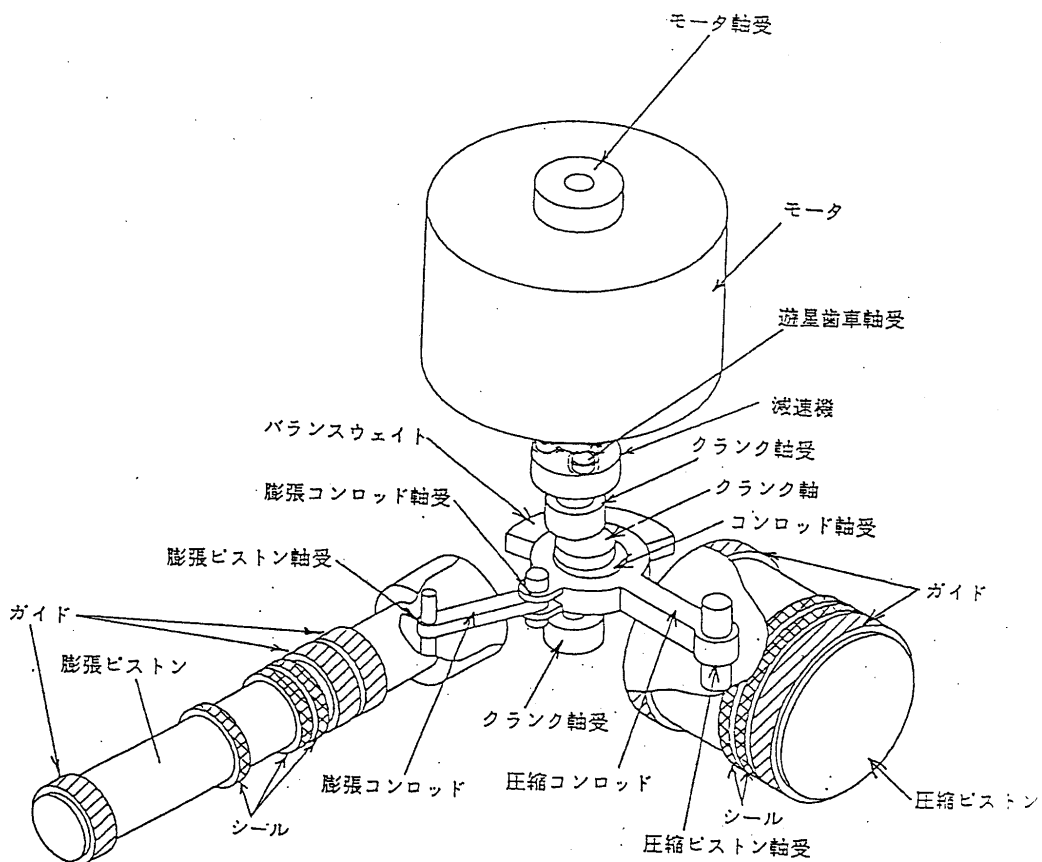


図3 冷却器の内部構造

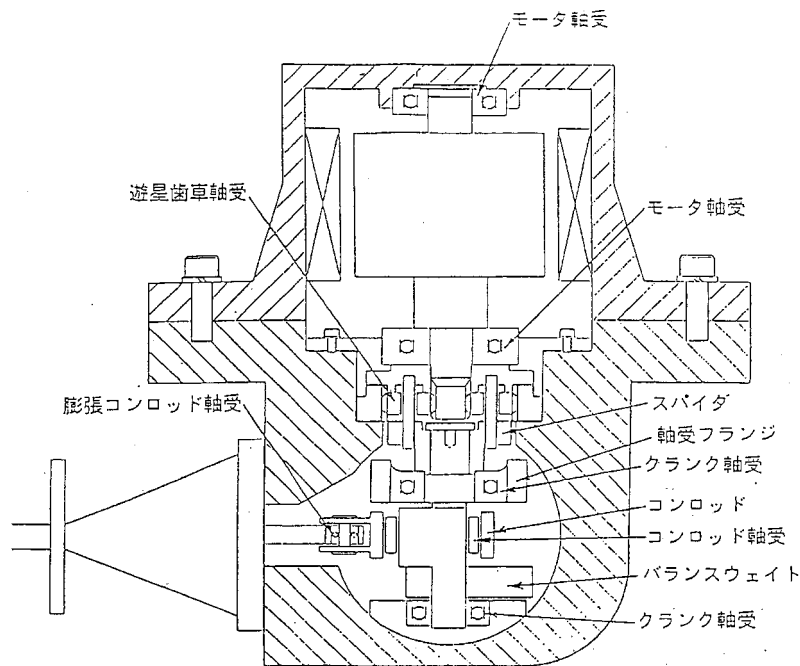


図4 冷却器の詳細な内部構造

## 2.2 ストレス緩和による不具合

事例：技術試験衛星 6 型 (ETS-VI) アンテナ展開確認用マイクロスイッチのテレメトリ不具合

技術試験衛星 6 型 (ETS-VI) は、大型静止三軸衛星バス技術の確立と、衛星による固定通信・移動体通信・衛星間通信に関する高度の衛星通信のための技術開発・実験を行うことを目的に、1994 年 8 月 28 日に H-II ロケットで種子島から打ち上げられた。衛星の外観を図 5 に示す。この衛星は他にアポジエンジンの不調により、ミッションの大部分が失われることとなったが、これとは別に、無重力に起因すると考えられる不具合が報告されている。

9 月 3 日、太陽電池とアンテナの展開が行われた際、直径 3.5m の大型アンテナ (20GHz 帯主反射鏡) の両翼が展開したことを示すラッチ信号が送出されなかった。アンテナの詳細を図 6 に示す。その原因として、「鏡面構造の地上における調整結果に及ぼす重力の影響が大きく、無重力環境でマイクロスイッチのアラインメントに狂いが生じた」と、9 月 22 日の宇宙開発委員会に報告がなされている。これに関しては、構造解析による解析として、マイクロスイッチを調整した際のアンテナのコンフィギュレーションを想定した重力変形

解析を実施し、無重力状態になった際に発生するマイクロスイッチのアラインメントのずれ量を定量的に求められている。ずれ方向およびずれ量を図7に示す。

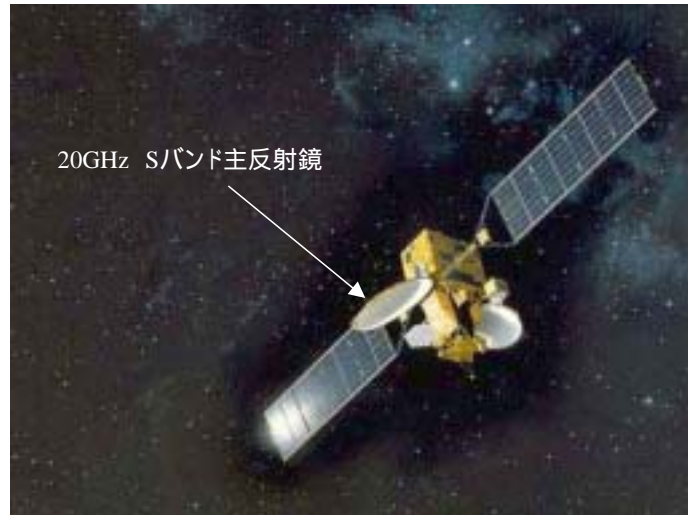


図5 ETS-VIの概観

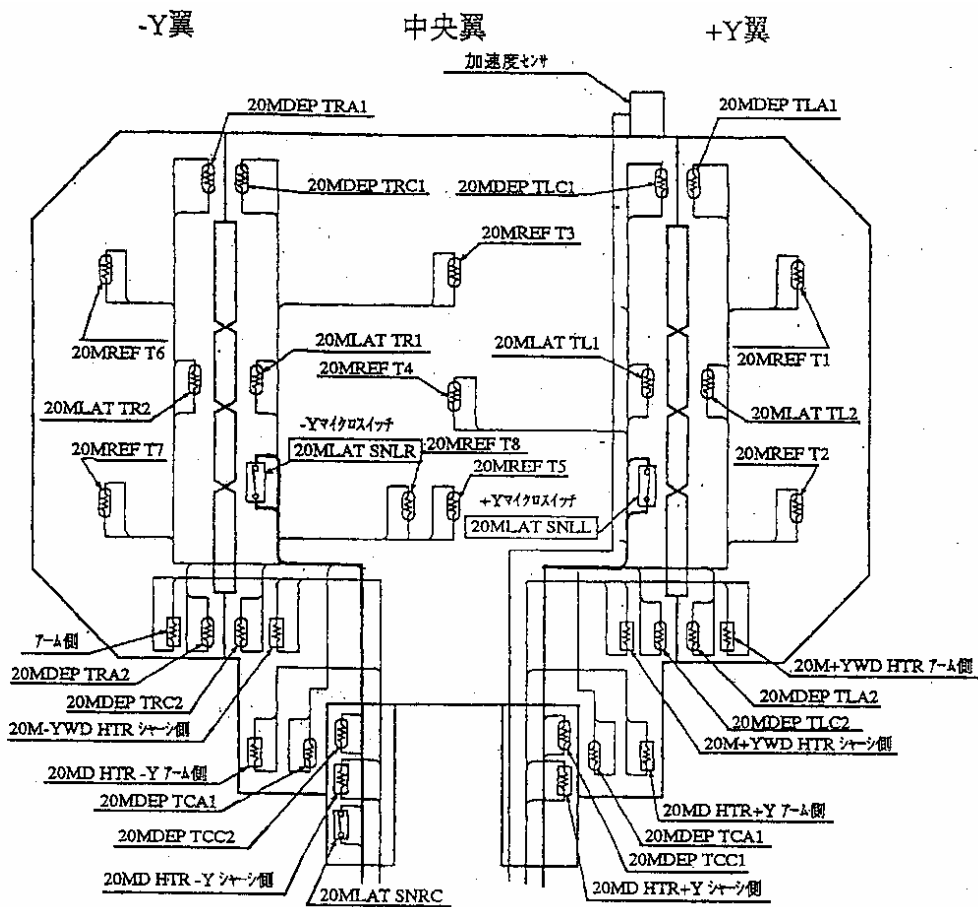
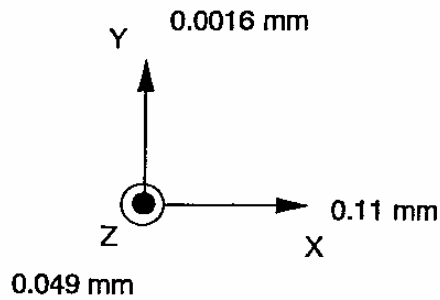
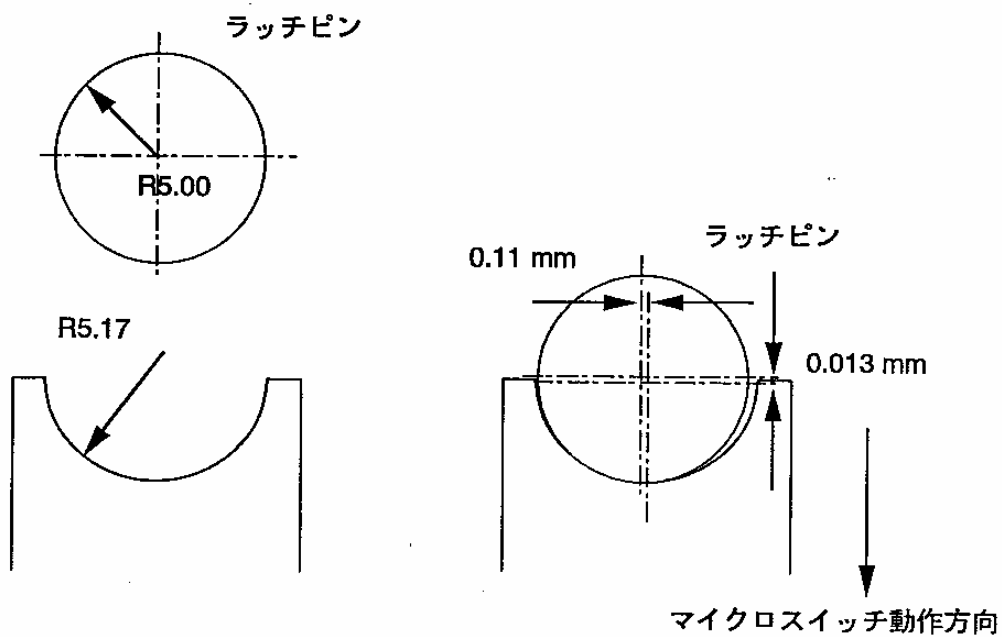


図6 反射鏡の詳細



構造解析モデルによって計算されたラッチ点位置のずれ量



X方向へのずれによって変化するマイクロスイッチ動作方向のクリアランス変化

図7 ずれ方向およびずれ量

### 2.3 力学効果による不具合

事例：SFU 回収時の太陽電池アレイ収納の不具合

宇宙実験・観測フリーフライヤー：Space Flyer Unit(SFU)は、文部省/宇宙科学研究所、科学技術庁/宇宙開発事業団、通商産業省/新エネルギー・産業技術総合開発機構/無人宇宙実験システム研究開発機構の3省庁4機関が共同で開発し、軌道上で回収を行ったシステムで、1995年3月18日、静止気象衛星5号(ひまわり5号)とともにNASDAのH-IIロケットで種子島から打ち上げられた。軌道上で各種の実験・観測を行い、NASAのスペースシャトル「エンデバー」に搭乗した若田宇宙飛行士により回収され、地球に帰

還したものである．図 8 に概要を示す．

SFU の太陽電池アレイはアレイブランケットと呼ばれる膜面に太陽電池を貼り付けた柔軟な構造物であり，屏風状に展開・収納する．図 9 に SFU の太陽電池アレイを示す．この太陽電池アレイを展開するには最も外側にあるアレイを引っ張るだけでよいが，収納するにはアレイの両端についているハーネスの復元力によって収納するようになっている．1996 年 1 月 13 日，スペースシャトルによる SFU の回収を前に太陽電池アレイを収納したところ，地上で事前に行った重力補償した試験でも現れなかった現象が衛星本体側 2 枚の太陽電池を貼っていないパネル（ブランクパネル）で起き，収納不能になった．この現象を調査したところ，落下による無重力実験の結果から，折れ癖のついている方向と逆の方向に折れ曲がる「逆折れ現象」が生じることが明らかとなった<sup>3)</sup>（図 10）．

対策としては，折り目の形状を制御することが有効と考えられる．例えば，折り目の中央にも収納用のばねを取り付けたり，折り目の軸を強くすることが挙げられる<sup>4)</sup>．

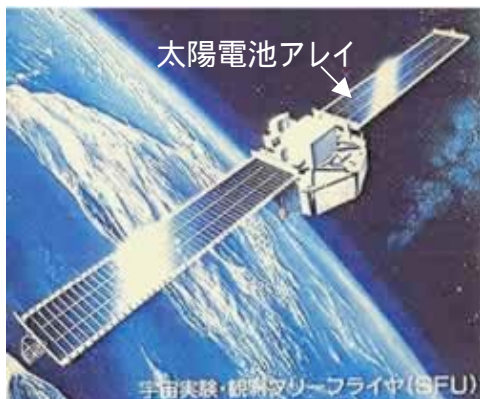


図 8 SFU の概観

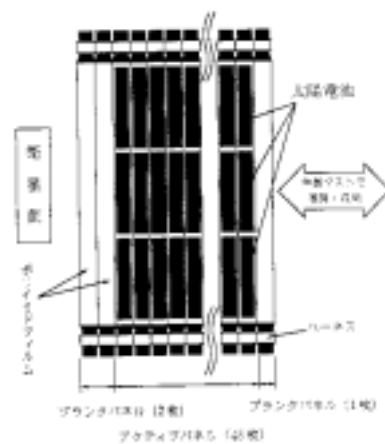


図 9 SFU の太陽電池アレイ

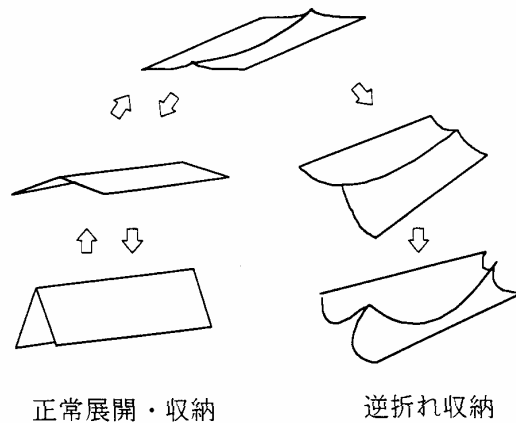


図 10 正常収納と逆折れ収納

## 2.4 流体・圧力の関与した不具合

事例：SKYLAB 尿採集装置の過剰空気<sup>5)</sup>

SKYLAB は米国の宇宙ステーションであり、アポロ計画の資材を応用したものである（図11）。その主要部はアポロ計画で用いられたサターン V 型ロケットの 4 段目を改造したもので、270m<sup>2</sup>の空間をもつ作業室であった。1973 年 5 月 14 日に無人で打ち上げられたが、隕石防止板ちぎれ、太陽電池パネルの 1 つを破壊したため計画の遂行が危ぶまれた。しかし、5 月 25 日にアポロ宇宙船で打ち上げられてドッキング後移乗した 2 名の宇宙飛行士により復旧した。

第 1 次クルーによる尿サンプルに関し、過剰空気によりサンプル体積が不足した（122～130ml が 90～100ml に減少）。サンプルサイクルにおいて、空気を取り除けなかった。地上の 1G のテストでは、容易に 122ml のサンプルが分離された。サンプルを採る尿バッグの圧力を保つことによりうまく働き、第 2、3 次クルーで採用された。採集バッグ中の空気は無重力環境下では分散し、結果的に尿サンプル中の空気が除去できなかった（図 12）。

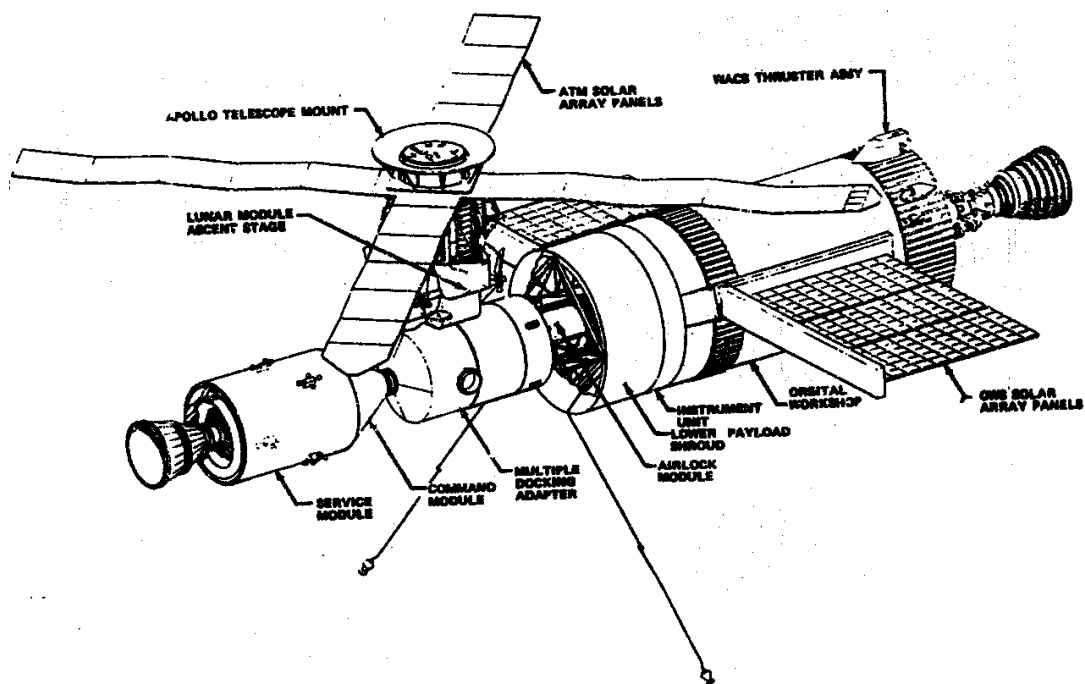


図 11 スカイラブ宇宙ステーション



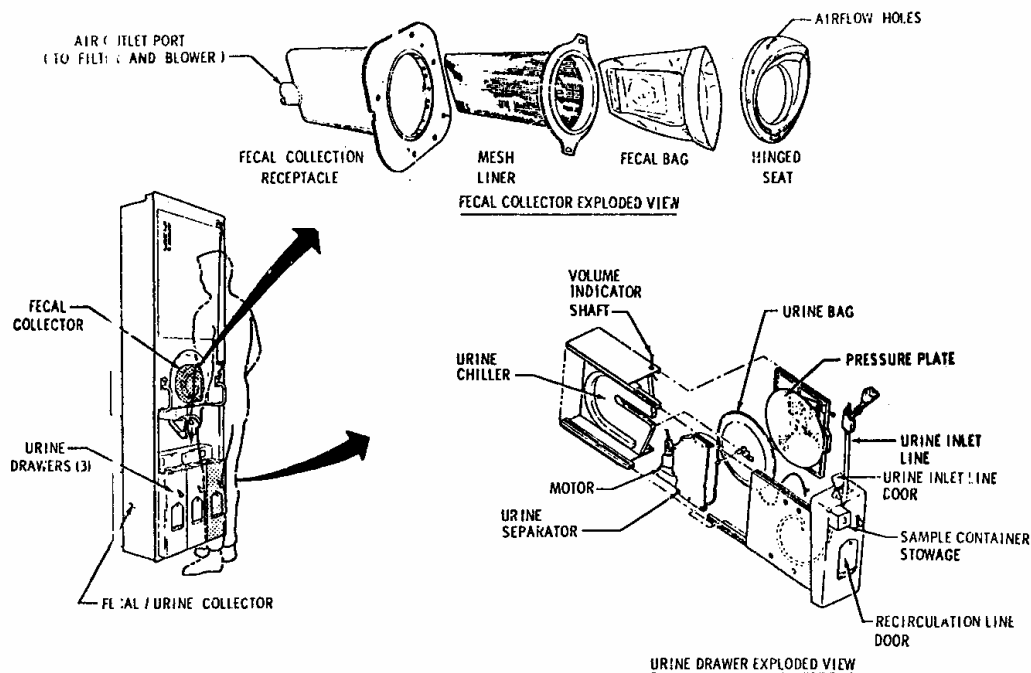


図 1 2 採尿システム

### 3. おわりに

宇宙システムにおける無重力環境に起因する不具合を 4 つ紹介した。それらは ( 1 ) 粒子の浮遊に起因するもの、( 2 ) 材料に重力下でかかっていたストレスが緩和することによって生じるもの、( 3 ) 重力下では微小で発現しなかった力学的な効果によるもの、( 4 ) 無重力下での特殊な流体现象によるもの、であり、地上での試験が困難であることから、あらかじめ対策を考えることが困難なものもある。

### 参考文献

- 1) 宇宙開発委員会技術評価部会，H-II ロケット試験機 1 号機の打上げ結果の評価及び地球資源衛星 1 号 ( JERS-1 ) の作動状況の評価について ( 報告 ) ，1994 ( 平成 6 年 8 月 ) 。
- 2) 技術試験衛星 VI 型特別調査委員会 ( 第 1 回 ) 資料 調査 1 - 6 ，1994 ( 平成 6 年 9 月 22 日 )
- 3) 名取，樋口，中條：“宇宙膜面展開構造物の収納挙動特性に関する実験”，微小重力環境下での剛体動力学の基礎研究，新エネルギー・産業技術総合開発機構，平成 9 年度調査報告書，NEDO-ITK-9797，1998 ( 平成 10 年 3 月 ) ，p.79-81.
- 4) 名取，樋口，安部，塩竈：“宇宙構造物の展開挙動”，微小重力環境下での剛体動力学

の基礎研究，新エネルギー・産業技術総合開発機構，平成 8 年度調査報告書，  
NEDO-ITK-9607，1997（平成 9 年 3 月），p. 38-59.

5) MSFC Skylab Structures and Mechanical Systems Mission Evaluation, NASA  
Technical Memorandum NASA TM X-64824, 1976, p.262-264.