

宇宙航空研究開発機構 中野屋壮吾

京都大学 平井康宏 酒井伸一

A research in the Waste Management of Human Space Systems

Japan Aerospace Exploration Agency Sogo NAKANOYA

Kyoto University Yasuhiro HIRAI, Shin-ichi SAKAI

1 はじめに

人類が初めて宇宙飛行し約 50 年が経とうとしている現在、軌道上には米国、ロシア、ヨーロッパ、日本の協力にて国際宇宙ステーション(以下、ISS)が建設され、宇宙飛行士(以下、クルー)が常時滞在できる環境が整いつつある。宇宙での生活では、微小な重力環境のため、不要な物は散乱してしまい、船内の空間も地上の建築物に比べて非常に狭く、廃棄物を船外へ排出する機会も限られているため、廃棄物処理技術の確立はクルーが安全・快適に生活する上で非常に重要である。

現状の有人宇宙活動における廃棄物処理システムは短期間または地球周回軌道でのミッションを前提としているため、廃棄物の処理工程は比較的単純であり、ISS では一般の廃棄物や宇宙飛行士からの排泄物は一部を除き、ほぼそのままの形で軌道上保管され、シャトルによる地上への回収またはプログレス宇宙船などにより大気圏突入時に焼却されることとなる。

しかしながら、ISS 後の有人宇宙ミッションとして検討されている有人惑星探査等の長期滞在型の有人宇宙ミッションにおいては、物資の輸送コストが非常に高くなるため、定期的な補給や廃棄の頻度はより少なくなり、保管スペースやクルーの衛生環境を確保するための、より高度の廃棄物処理工程が不可欠となる。

本稿は、有人宇宙活動における廃棄物処理の現状と、打上げ後約 2 年間軌道上で運用した「きぼう」システム(図 1-2)での廃棄物排出量、今後の課題を報告するものである。

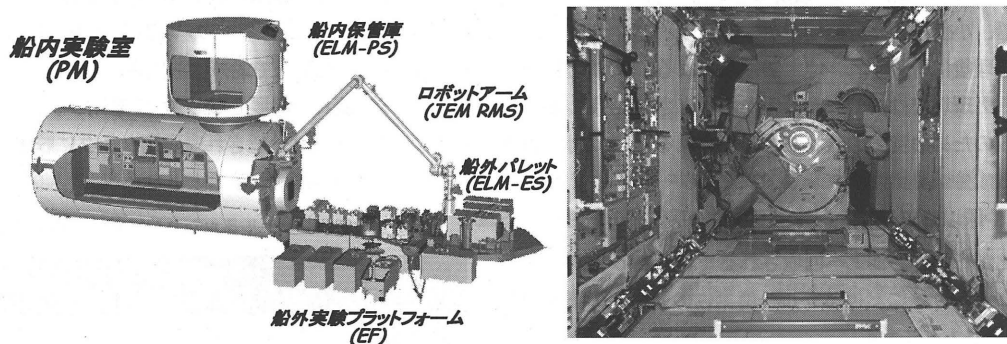


図 1-2 きぼう外観(左)と軌道上の船内実験室の様子(右)

2 有人宇宙活動における廃棄物の特徴

有人宇宙活動にて排出される廃棄物は、クルー一般廃棄物、システム機器廃棄物、実験廃棄物、打上げ用拘束具に分類されるが<sup>1)</sup>、それぞれの特徴は以下の通り。

A) クルー一般廃棄物

クルーの生活活動から発生する、使用済み製品、使用済み衣類、糞尿、食糧パックおよびパックに付着した食物、髪の毛などの人体から出るごみ等が含まれる。表 2.1-1 に既存の研究によるクルー一般廃棄物の発生予測を示す<sup>2)</sup>。

有人宇宙活動における廃棄物の特徴として、食器などの洗浄には水で洗い流すのではなく、ワイプで拭き取るため、ティッシュやワイプの発生量が多くなっている。また、微小重力環境にてふわふわ浮いてしまう物の固定や清掃に用いるグレイ/ダクトテープが計上されている。これらのクルー一般廃棄物を収納する容器としてISSでは、通常の廃棄物を収納するSoft Trash Bagの他に食べ残しや臭気の強い廃棄物を収納するFood Waste Bagがある。また、便や尿は各々専用の容器に貯蔵されている<sup>1)</sup>。

#### B) システム機器廃棄物/実験廃棄物/打上げ用拘束具

クルー一般廃棄物の他に発生する廃棄物としては、使用期限切れおよび消耗、故障により不要となったシステム機器や宇宙実験により発生する実験廃棄物、打上げ時の振動環境や荷重に対応するために機器を拘束し、軌道上の微小重力環境では不要となる打上げ用拘束具がある<sup>1)</sup>。上記のクルー一般廃棄物用の容器に収納できない廃棄物に関しては、打上時に収納される一般的にCargo Transfer Bag(CTB)を用いるか、必要に応じて廃棄用の容器が開発されている。尚、廃棄物の容積を示す単位として、CTB(50.2×42.5×24.8 [cm])を一つの単位としてCTBの個数換算で容積を評価する場合が多い。

### 3 現在の有人宇宙活動における廃棄物処理

#### 3.1 スペースシャトルでの廃棄物処理

スペースシャトルは1981年から運用が開始された宇宙往還機であり、通常5~7名のクルーが最大15日間地球軌道上を周回し、宇宙環境を利用した実験やISSの建設を行ってきた。2010年6月現在、132回の打上げが行われ、2010年末の退役まで残り2回の飛行が予定されている<sup>3)</sup>。

シャトルではクルー一般廃棄物のうち、便や尿の処理システムとして、Waste Collection System(WCS)が搭載され、便器、小便器、水分離用ファン、臭気・バクテリアフィルター等から構成される<sup>4)</sup>。このWCSにより便は真空乾燥処理後に貯蔵され、地上で回収される。尿は廃棄用タンクへ貯蔵され、軌道上で船外に放出される<sup>4)</sup>。また、微小重力環境では便や尿が人体から排出された際に収集するために空気の流れが必要となり、水分離用ファンにより回収のための空気の流れが生み出される<sup>4)</sup>。この水分離用ファンにより、水分は分離され廃棄用タンクに貯蔵され、空気成分は臭気・バクテリアフィルターを通して浄化された後にキャビンへ戻されることとなる<sup>4)</sup>。

便や尿以外のクルー一般廃棄物は、手作業の圧縮による減量化が行われ、地上へ回収される<sup>5)</sup>。過去6回のシャトルミッションにおけるクルー一般廃棄物の発生量の調査結果<sup>3)</sup>を表3.1-1に示す。

固形の廃棄物に関しては、一人あたり一日の発生量は重量換算では1985年から2000年では平均1.39[kg/人・日]であり、ミッションにより顕著な増減傾向は見られないが、体積に関しては1989年に13.9[L]であったものが2000年には最少2.9[L]と、後のミッションにつれて、大きく減少傾向にある<sup>2)</sup>。これは廃棄物容積を減らすための圧縮技術の向上によるものである。

また、廃棄物の内訳としては、食品及びそのパッケージ類が全体の50[%]以上を占め、そのうち食べ残し品の割合が一番多いことが示されている<sup>2)</sup>。

表 2.1-1 クルー一般廃棄物の発生予測<sup>2)</sup>

廃棄物	発生予測 [g/人・日]	廃棄物	発生予測 [g/人・日]
髪などの人体からの屑	15.8	食物パッケージ、および付着食物	324
生理用品類	217.4 (生理期間のみ)	グレイ/ダクトテープ	33
便	123	トイレトペーパー、ワイプなど	206
尿	1562	手袋	7
紙	77		

表 3.1-1 過去のシャトルミッションにおける廃棄物量<sup>2)</sup>

ミッション名	期間 [人・日]	廃棄物(固形)		打上年
		[kg/人・日]	[L/人・日]	
STS-51D	49	1.01	-	1985
STS-29	25	1.49	13.9	1989
STS-30	20	1.63	13.3	1989
STS-35	63	1.14	6.7	1990
STS-99	66	1.47	2.9	2000
STS-101	63	1.62	4.1	2000
平均	48	1.39	8.2	-

### 3.2 ISSでの廃棄物処理

ISSは1999年から軌道上に建設開始され、当初はクルー3名体制で運用され、2009年から6名体制となった<sup>6)</sup>。2010年6月現在、有人での活動日数は3500日を超え、大小合わせて14の与圧モジュールと太陽電池パドル等を支える外部トラス構造により構成され、2010年秋の完成を予定している<sup>6)</sup>。

ISSにて発生するクルー一般廃棄物のうち、尿は、Water Recovery System (WRS)により水分回収・再生され、クルーの飲料用にも用いられる<sup>7)</sup>。

その他の便を含めたクルー一般廃棄物は2項に述べた容器に保管され、最終的にはシャトルのミッドデッキやペイロードベイ内の多目的輸送モジュール(MPLM)に搭載され地上に回収されるか、プログレス宇宙船やH-II Transfer Vehicle (HTV)により大気圏再突入時に機体ごと焼却される。ただし、廃水に関しては、米国実験等またはスペースシャトルのISSドック時にスペースシャトル船内に輸送され、必要に応じて船外に排出されることもある<sup>10)</sup>。この船外へ排出される廃水の種類としては、①キャビンエアの除湿に伴って生成される凝縮水(不揮発性残渣=0.004[%])、②燃料電池の反応による生成水(不揮発性残渣=0[%])、③尿(不揮発性残渣=4[%])の3種類ある<sup>8)</sup>。スペースシャトルからの廃水の排出ノズルはスペースシャトル前方の左右に位置するため、ISSドック時には「きぼう」の方向にも噴き出すこととなる。このため、廃水の排出による残渣の堆積量についてJAXAとボーイング社が共同で解析を行った<sup>9)</sup>。光学機器等に対して影響を与えない残渣の堆積量として一年間に130[A]を超えない量の堆積量であることを要求性能<sup>10)</sup>とし、外部汚染解析を行った結果、凝縮水の排出による堆積量は10.82[A]/フライトであり、年間最大6フライトと想定しても64.92[A]となりISSドック中の排出は許容できることが示された<sup>9)</sup>。しかしながら、尿に関しては凝縮水に比べて不揮発性残渣が約1000倍と非常に多いことから、「きぼう」の取り付け後は尿を船外へ排出することはフライトルールにて禁止することとした<sup>11)</sup>。

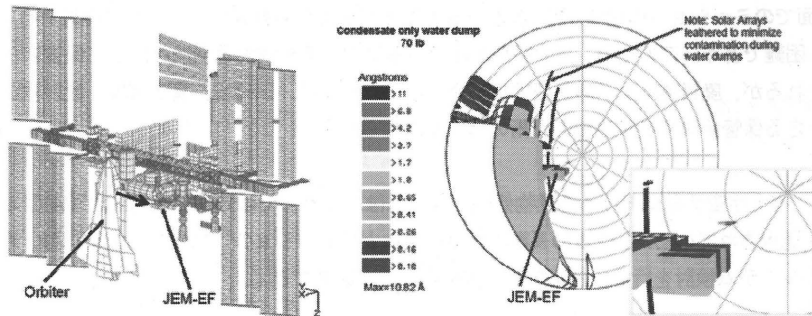


図 3.2-1 スペースシャトルと「きぼう」モジュールの位置関係<sup>9)</sup>(左)、シャトルノズルからみた残渣の堆積量解析結果<sup>9)</sup>(右)

### 3.3 「きぼう」で発生する廃棄物の処理

ISSの一要素である日本実験棟「きぼう」は2008年3月から軌道上面に組立て・運用が行われている。通常2名が実験活動を行い、最大4名の入室が可能な軌道上実験施設である。

これまでの約2年間の運用において、システムハードウェア廃棄物と実験廃棄物、打上げ拘束具は合わせて、384アイテムが廃棄物としてマニフェストされ、10フライトにて廃棄されている。廃棄物の内訳としては、多くが打ち上げ時の荷重や振動環境に耐えるための拘束用部品やクッション材を含む打上げ拘束具であり、コンポーネントが故障または寿命にて廃棄されたケースは蛍光灯のみである。廃棄されたアイテムを集計した結果、合計218.9[kg]、容積では190.8[CTB換算]となり、平均すると1CTBあたり重量は1.1[kg]となる。打ち上げ時の梱包では、1CTBあたり重量は11.6[kg]であるので、廃棄時の1CTBあたり重量は打上げ時比べて約1/10となっていることがわかった。また、現状、故障した機器はシャトルにて帰還し、修理後に再打ち上げされているが、2010年秋以降のスペースシャトル退役後は、故障した機器はプログレス等により廃棄されることとなる。

#### 4 今後の課題

将来の有人宇宙活動における廃棄物処理に必要な技術の分野は大きく、以下に分けることができる。

##### ①発生抑制・減量化技術

3.3 項の「きぼう」の例にもみられるように、打上時と廃棄時の CTB あたりの重量は大きく乖離しており、同じ容積の補給機で打上げ/廃棄を繰り返す限り、船内の限られた空間には廃棄物が貯まる一方となる。現状は、発生した廃棄物をクルーの手足をつかった作業により圧縮しているが、機械による圧縮機の開発や熱溶解等による減量化装置の開発などによる廃棄物の減量化は限られた空間を有効に使うために必要な技術である。

##### ②安全化・安定化技術

長期の宇宙ミッションにおいては、廃棄物が長期間船内に保管されることで、腐敗により臭気の発生やバクテリアの増殖が進んでしまい、狭い船内のクルーの衛生環境を著しく悪化させることが懸念される。このため、真空乾燥技術等により、発生した廃棄物を乾燥させ形態を安定させる技術の確立が重要である。また、医療環境の整備されていない宇宙にてクルーに怪我を負わせたり病気になることがないように、衛生や安全上好ましくない処理工程は自動化されるようにする技術が必要である。

##### ③資源・水分・エネルギー回収技術

ISS では比較的頻繁に物資の補給・廃棄が行われているが、月面探査や惑星往還等の補給の頻度が低いミッションを遂行するには、廃棄物からの資源・水分の回収が必須となる。現状は 3.2 項に述べたように尿や凝縮水から水分の回収を行うのみであるが、より長期のミッションにおいては、尿以外の食糧くずなどの湿った廃棄物からの水分回収や堆肥化により、食糧の再生産につなげるシステム構築やエネルギー回収技術の確立が必要となる。

##### ④保管・廃棄技術

月や惑星表面でのミッションの場合、ISS と違い重力環境があるため廃棄物を持ち帰り廃棄することは、コストや技術面から困難である。このため、月や惑星表面上の基地内で廃棄物が長期にわたって保管または放置されることが想定されるが、廃棄物により惑星表面を汚染しないためには、熱環境、真空環境、放射線環境に長期間耐えることのできる保管手法や廃棄手法の技術の確立が求められる。

以上のように、有人宇宙活動における廃棄物処理システムは、これまでは短期間または地球周回ミッションを前提として技術が選択されているが、今後の長期の惑星探査などのミッションに対応するためには、その目的に応じた廃棄物処理のシステム検討を行い、技術開発を進めることが必要である。

#### 参考文献

- 1) NASA(2005): Management Plan for Waste Collection and Disposal
- 2) A Hanford (2004):Advanced Life Support Baseline Values and Assumptions Document
- 3) NASA(2010): STS-132 Press Kit
- 4)NASA HP: Waste Collection System (<http://spaceflight.nasa.gov/shuttle/reference/shutref/orbiter/ecss/wcs.html>)
- 5)G Pace, et al (2007): Waste Compaction Technology Development for Human Space Exploration Missions
- 6)NASA(2010): Expedition 23 and 24 Press Kit
- 7)D Link, et al (2007): International Space Station USOS Waste and Hygiene Compartment Development
- 8)Soares, et al (2010): Protection From Induced Space Environments Effects on The International Space Station.
- 9)D Schmidl, et al(2006): Orbiter Water Dumps Onto JEM-ICS and JEM-EF Payloads
- 10)NASA(1999): Space Station External Contamination Control Requirements
- 11)NASA(2009): Joint Shuttle-ISS Operational Flight Rules

キーワード: 有人宇宙活動、国際宇宙ステーション、廃棄物処理

**Key Words:** Human Space Systems, Space Station, Waste Management