宇宙服の技術

木部勢至朗*・鈴木 克徳*

(受理1995年3月20日, 掲載決定1995年5月6日)

Space Suits Technology

Seishiro KIBE and Katsunori SUZUKI

(National Aerospace Laboratory, 7-44-1 Jindaijihigashimachi, Chofu-City, Tokyo)

(Received March 20, 1995, Accepted May 6, 1995)

1. はじめに

本解説では, 宇宙服の技術現状と展望を述べることに
なっている。宇宙服とは, 狭義或いは一般用語としては
宇宙空間で作業する際に搭乗員が着用している。所謂
“服”の部分だけを指す場合が多く, 生命維持や作業支
援の為のシステムを含めた場合には, 船外活動服システ
ム (Extravehicular Mobility Unit) と呼ばれる。後者
は, スペースシャトル, 宇宙ステーションから搭乗員が
宇宙空間に出て, 短時間ながら独自で作業することを可
能とするシステム全体のことを指しており, 本システム
が「最小」の宇宙船と呼ばれる所以ともなっている (図
1)。

また, 打ち上げ/帰還の際に宇宙飛行士が着用する気
密服のことも一般には宇宙服と呼ぶようであるが, これ
は生命維持に必要な酸素, 冷却水等を母船システムから
の供給に頼っており, それだけでは勿論宇宙空間に出る
ことは出来ず, 正確には船内活動服と呼んで区別され
る。

以下本解説では, 船外活動服システムを構成する技術
の概要について述べることにする。

2. 宇宙環境と船外活動服システムの機能

船外活動服システムに要求される機能は, 大きく2種
類に分類される。一つは, 苛酷な宇宙環境から作業者を

図1 スペースシャトル用船外活動システム

隔離・防護し, その生存を確保することであり, いま一
つは, 作業者が宇宙空間に於いて何等かの作業を行うこ
とを可能とすることである。

船外活動服の設計上考慮すべき宇宙環境を整理すると
以下の様になる。

真空環境: 地球周回軌道上では, 高度が増すに従って

* 航空宇宙技術研究所宇宙研究グループ第4研究グループ (調布市深大
寺東町 7-44-1)

図2 宇宙空間での熱入出力

真空度が高くなり、 $10^{-3} \sim 10^{-5}$ Paにも達する。また、希薄大気の粗成も地上に於けるそれとは大きく異なったものとなる。特に、地上に於いては安定した分子構造である酸素は、太陽紫外線等の影響により非常に反応活性の高い原子状酸素の状態が存在し、船外活動服を含む宇宙システムの構造材料の劣化（酸化）を引き起こす可能性がある。

熱環境：地球周回軌道上の物体は、太陽熱輻射（約1400 W）、地球赤外熱輻射（約240 W）、地球アルベド（太陽光の地球表面による反射：約400 W）等の熱入力を受ける。また放熱としては、絶対温度3 Kの宇宙空間に対する熱輻射を考慮する必要がある（図2）。

宇宙放射線環境：地球周回軌道上では、太陽放射線（太陽活動を起源とする）、銀河宇宙線（太陽系外を起源とするもの）、捕捉放射線（地球磁場によって捕捉された荷電粒子によるもの）が存在する。最後の捕捉放射線は発見者の名前に因んで、バンアレン帯として知られているもので、内帯（陽子帯）と外帯（電子帯）に分れている。特に南太平洋上では、地球磁場の影響でバンアレン帯の下限高度が低くなっており、しばしば宇宙システムに不具合を生じさせることから、南太平洋異常帯（South Atlantic Anomaly）と呼ばれている。

デブリ（宇宙ゴミ）/メテオロイド（微小隕石）：これまでの人類の宇宙開発活動の結果、地球周回軌道上には、大きいものではミッション終了後の不用衛星、ロケット上段、分離・展開用機構部品、光学機器カバー等が、小さいものでは上記物体の劣化、軌道上爆発等による破片、固体ロケットモータからの酸化アルミナ微粉等が、それぞれの軌道速度で飛回っている。大きいもの（直径10 cm以上）は、7000個程度と数も少なく衝突の危険性も少ない上、地上からの観測により軌道も分っているので比較的問題はない(?)が、ミリ及びマイクロオーダーのデブリに至っては、その数も数百万個と桁違いに多くなる上、飛んでいる軌道も不明であることから、宇宙システム側で何等かの防護方策を講ずる必要が生じ

図3 スペースデブリ/メテオロイド環境

図4 宇宙服システムの機能構成

ている。またメテオロイドは、常に大気圏の中に200 kg程度存在しており、ある大きさの範囲では依然としてデブリよりも数量的に危険である（図3）。

このような苛酷な宇宙環境から宇宙飛行士を保護し、また何等かの作業を可能とするための船外活動服システムには様々な工夫が為されており、以下の様なサブシステムから構成されている（図4）。

外被機構系サブシステム：所謂宇宙服の部分であり、作業者を宇宙の真空空間から隔離し、与圧環境を保持すると共に、宇宙放射線、デブリ/マイクロメテオロイド等から防護する。さらに作業を可能とするため、服内圧に抗して人体の関節部等の可動部位に於ける可撓性を確保するための機構部を含む。

ガス分圧制御サブシステム：船外活動服の内部を適切な圧力に保つと共に、人間が呼吸するために必要な酸素分圧を確保し、呼吸により生ずる二酸化炭素や有害な微量ガスを除去する。

温湿度・熱制御サブシステム：熱環境で述べた様な外的な熱入出力に加えて、船外活動服の中の作業者による生理産熱、生命維持装置に於ける機械的・化学的熱発生をうまくバランスさせ、服内を快適な温度状態を保つと

図5 スペースシャトル用スーツの構造

共に、湿度の制御も行う。

通信・システム管理サブシステム：スペースシャトル等の母船との通信や、船外活動服システム全体の制御・管理を行う。

電力系サブシステム：船外活動服システムに必要な電力を供給する。

上記船外活動服システムを構成するサブシステムの中で、特に興味深いと考えられる外被機構系サブシステム、ガス分圧制御サブシステム、温湿度・熱制御サブシステムについて、著者等の研究成果も含めて以下に技術現状を詳しく述べることにする。

3. 船外活動服の構造/機構

所謂“宇宙服”の部分であり、図5にスペースシャトル用のスーツの構造を示す。

まず、上述の苛酷な宇宙環境から作業員を隔離し、生存可能な空間を確保するという観点から考えてみると、第1に真空環境に対する気密性が重要な課題となりそうである。宇宙服というと、さぞ完全な気密性が保たれていると思われるかもしれないが、実はかなりの洩れがある。例えば、マーキュリー、ジェミニ計画で用いられた宇宙服は、1気圧試験条件下では3600 CC/minの洩れが計測されているし、アポロ宇宙服に於いても180 CC/min、現在使用されているスペースシャトル用のものでも136 CC/minもの洩れがある。宇宙で使用する際は、1/3気圧程度の減圧環境で使用するようになるので、実際の洩れは上記値の数分の一となるが、いずれにせよそれほど完全な気密性が保たれているわけではない。これは主に可動性・作業性を確保するためのベアリング等からの洩れに起因するものであり、致し方ないことなのである。要は、ミッション時間内に洩れた分の空気を補

図6 外被積層構造

えば良いということになる。

服地の部分の気密性は、図6に示す外被多層構造の最内層であるゴム引きされたリップストップ（縦横に太い繊維を織り込んだ）ナイロン地からなるブラダー層によって保持されるが、その他の積層材は表1に示す様に、断熱、耐デブリ/メテオロイド等の機能を果たしている。最外層は、作業中燃えたり破れたりしない様にケブラーノームックスの織布層からなっている。

次に作業性の観点である。宇宙の真空環境下では、内圧1/3気圧といっても、そのままでは宇宙服は空気を入れ過ぎたゴムマリの様になり、それに抗して作業することは不可能な状態となる。実際初期の宇宙服（船内服）は、その様なものであったが、これは打ち上げ、帰還時に於ける安全確保に着用するものであり、それを着用して何等かの作業を行うためのものではなかったからである。だいた初期の宇宙船は船内空間が極めて狭く、動き回る必要もなかったのである。しかし、アポロ計画以

表1 外被積層構成の機能

材 質	機能1	機能2	機能3
ラバー・コーテッド・ナイロン(リップストップ) アルミ蒸着マイラー* (5層)	内部ライナー 熱輻射 遮蔽	熱防護	熱・小隕石防護
非織布ダクロン* (4層)	スぺーサー		
アルミ蒸着カプトン フィルム/ベータ薄布 (2層)	熱輻射 遮蔽		
テフロン・コーテッド・ ベータクロス	不燃・ 耐摩耗 層		
テフロン・クロス	不燃・ 耐摩耗 パッチ		

* 断熱・スぺーサー層を交互に積層

図7 関節試験用グローブボックス

図9 フレキシブルベローズ型関節モデル

図8 筒袖型関節モデル

図10 ローリングコンポジット型関節

降の船外活動服は、岩石試料採取、故障修理等の作業実施を前提としており、色々な工夫が為されている。

人体の動きには、肘・膝や指関節の様な体軸に直交する軸回りの曲げ回転と、前腕部の動きで代表される体軸方向の振り回転とがある。部位によっては、これらの複合或いは、多重の自由度を持ったものもあり、それらの運動に対して過度の拘束力が働かないように工夫しなければならない。

先ず曲げ運動であるが、著者等は関節部の可撓性を検討するため、図7に示す観察用の透明なグローブボックスと、肘関節を想定して図8に示す何の工夫もしていない筒袖状の関節モデルを比較基準として試作してみた。グローブボックス内の圧力を内外圧差1/3気圧（船外活動服は、この程度の内圧で運用される）で試験してみたが、1/5気圧を超えるあたりから、とても普通の人の力では曲げることが出来ないことが分った。これは肘を曲げることによる内容積の減少分の圧力仕事をしなければならないと、内圧による服地の面内剛性の増加によるものであると考えられる。そこで、次に図9に示す様

Developed flat pattern sections are gore-shaped

- 1 Flexible, flat pattern sections
- 2 Neutral axis restraint

図11 フラットパターン型関節

なフレキシブルベローズ型のモデルの試作・試験を実施した。ベローズ構造にすることによって、体積変化を小さくし、さらに肘の曲げ運動が服地の面外変形によって実現されるように工夫したのである。詳細なデータは現在取得中であるが、1/5気圧での結果は非常に良好で、曲げ運動に関しては殆ど抵抗感が感じられなかった。

現在使用されている実際の宇宙服でも、以上述べた観

点から様々な工夫がなされており、図10、図11にその幾つかを示しておく。

振り運動に関しては、体軸方向に軸を持つベアリングを用いることになるが、本節冒頭で述べた様に気密性が大きな問題となる。スペースシャトル用のスーツでは、図12に示す様なY型のシールにより、内圧による軸方向力により気密性が向上する仕組みになっている。ベアリングというごくありふれた部品でも、低トルクと気密性を両立させるため現在も研究が進められており、迷路型のベアリング等が考案されている。

4. 宇宙服の温湿度・熱制御

船外活動システムを取り巻く熱環境としては、2.でも述べた様に、太陽熱輻射、地球赤外熱輻射、地球アルベド等の熱入力と、放熱として絶対温度3Kの宇宙空間に対する熱輻射を考慮する必要がある。外的な要因については、基本的に断熱構造とすることで問題を簡単化することが出来るが、船外活動服システム固有の技術課題として、人体の生理代謝による産熱の処理の問題がある(図2)。船外活動服内はスペースが小さく、代謝による発熱・発汗が服内気候に大きな影響を及ぼすからである。

この問題は、大きく人体からの産熱をどうやって集熱

するかという問題と、その集めた熱をどうやって宇宙空間に捨てるかという問題に分けて考えることが出来る。

前者、集熱は服内空気の換気と冷却下着によって行われる。現用の冷却下着は図13の様に、伸縮性のあるスパンデックス地の下着に細いチューブが縫込んであり、このチューブに冷たい水を流すことにより皮膚表面を直接冷却する。換気によるものも含めて、熱伝達の様子を図14に示す。皮膚表面からチューブ壁を介しての冷却水の熱伝達、潜熱移動としての発汗、その発汗の冷却チューブ上への再凝縮による熱移動等極めて複雑な伝達経路系を構成している。著者等も同様の下着を試作して、集熱の基本特性を取得するための実験を実施しているが、人間の体温自律調節機能及び、過度に低温の冷却水は被験者にかえって不快感を与えるという理由から、皮膚表面から冷却水への直接熱伝達による集熱には限界があり、それだけで発汗を抑えることは出来ないこと、それよりむしろ換気による汗蒸気の除去が快適性を向上させること等がわかってきている。

さて、この様なメカニズムで集熱された熱は、何等かの方法で処理しなければならない。宇宙空間に於ける熱の処理は、対流等が利用できる地上と較べ特別な工夫が必要となってくるが、基本的には①宇宙空間への輻射、②蓄熱(顕熱、潜熱)、③高温物質/相変化した物質の放

図12 気密ベアリング

図14 皮膚表面での熱伝達

図13 冷却下着

図15 サブリメータ

図16 ガス分圧/温湿度・熱制御系ブロック図

出の何れかの方法によるしかない。

現用の排熱機構は、米国、ロシア共3番目の相変化した物質の放出による方法を採用しており、その機構を模式的に図15に示す。これはサブリメータと呼ばれる装置で、服内の空気から回収した水などをフィードウォーターとして多孔質金属板に流すことにより、金属板表層部に氷の相を形成する様になっている。この水が宇宙の真空空間に水蒸気となって放出される際に、潜熱として大量の熱量を奪って行くことになる。このサブリメータの近くを、先に述べた冷却下着用の冷却水や、人体によって暖められた空気を通すことによって冷却する。特に服内の空気は人間の呼吸によって、かなり高湿度となっており、この部分で露点凝縮させることで除湿も同時に行うことが出来る。温湿度・熱制御システムのブロック図を図16に示す。また冷却水の温度は作業中作業者の手動操作により変えることが出来るが、これはブロック図中右上の温度調節バルブにより、冷却水を上述のサブリメータ冷却器へ流れる分と、それをバイパスする分の割合を変化させることで調節される。

5. 宇宙服のガス環境制御

服内のガス環境制御としては、全圧とガス分圧制御が必要となってくる。現用の船外活動服システムは、外被機構系の強度上の問題及び作業性確保の観点から、全圧0.3～0.4気圧の純酸素環境で運用されており、全圧制御の問題は、その圧力環境への人体の適応能力の問題に、分圧制御は呼吸により発生する二酸化炭素の除去の問題として捉えられることができる。

前者については、0.3気圧程度の純酸素環境は、肺に於ける酸素/二酸化炭素ガス交換の観点からは十分呼吸

図17 プリブリージング時間

可能な環境であると考えられる。何故なら、地上大気に於ける酸素分圧は0.2気圧程度であり、肺に於けるガス交換が基本的には肺胞膜を通しての拡散現象であることを考慮すれば当然の事であると考えられる。しかし、1気圧地上大気組成と同様の宇宙船環境から上記0.3気圧服内環境への急激な移行については、極めて大きな生理的な問題が生ずる可能性がある。これは潜水作業に於ける潜水病の問題と等価なものであり、この様な急激なガス環境の変化に人体が晒されると、体液中に溶解していた窒素が体内でガス化し、関節部に集り激痛を生ずる「ベンズ」という症状を呈し、甚だしい場合には死に至ることもある。この為、現用の船外活動システムでは、船外活動前数時間に渡るプリブリージングと呼ばれる適応プロセスが実施される。そこでは服内大気の酸素分圧を徐々に上げると共に全圧を低下させ、体液中の窒素を可能な限り体外に排出するのである。その為に必要な時間は、最終的な運用純酸素圧力に依存し、圧力が低いほ

表2 二酸化炭素除去剤の性能

物質	理論吸収能力 (lb CO ₂ /lb 吸収剤)	吸収時の発熱量 (Btu/lb CO ₂)	炭酸塩分散温度 (°F)
酸化リチウム Li ₂ O	1.47	2210	
水酸化リチウム LiOH	0.92	875	
酸化ナトリウム Na ₂ O	0.71	3140	1290
水酸化ナトリウム NaOH	0.55	1228	1290
酸化カリウム K ₂ O	0.47	3820	1340
水酸化カリウム KOH	0.39	1395	1340
酸化マグネシウム MgO	1.09	1150	840~1020
水酸化マグネシウム Mg(OH) ₂	0.76	358	840~1020
酸化カルシウム CaO	0.79	1738	1345~1515
水酸化カルシウム CaO(OH) ₂	0.60	670	1345~1515
酸化銀 Ag ₂ O	0.19	151	250~300
酸化カドミウム CdO	0.34	975	660

(Coe et al., 1962)

ど長時間を要する(図17)。図から分る様に、運用純酸素圧力が0.6気圧程度になると上記プリブリーディングは必要無くなり、極めて好都合の様に思えるが、本節冒頭でも述べたように、外被の強度及び作業性の観点から上記の様な運用圧が用いられている。宇宙ステーション時代には、従来より繁雑且つ長時間の船外活動が想定されるため、NASAを中心として改良の為の研究開発が現在も進められている。

さて、後者のガス分圧の制御であるが、純酸素環境での分圧制御であるので、呼吸及び人体生理代謝によって生ずる二酸化炭素、メタン、アンモニア等の有害ガスを循環大気から除去することになる。以下、この中で大きな割合を占める二酸化炭素除去について述べることにする。

人間は1時間当たり平均30g強の酸素を取込み、40g程の二酸化炭素を排出している。従って船外活動の間その排出された二酸化炭素を除去し、酸素を補給してやる必要がある。二酸化炭素の除去法には、モレキュラ・シーブ、膜分離、物理吸着、化学反応利用等種々の方法が考えられるが、現用のシステムでは、信頼性及び除去効率

図18 酸化銀の再生温度と80%再生時間

の観点から化学反応利用、特に水酸化リチウムが用いられている。表2に幾つかの二酸化炭素除去剤の性能が纏めて示してある。表から水酸化リチウムの吸収能力が他のものに比べて高いことが分る。基本的な反応は

の様であり、反応に際してはかなり大量な熱が発生する。逆に言えば、使用済みの炭酸リチウムを再生するためには極めて高温の環境が必要ということであり、基本的に使い捨てとなる。前にも述べた様に、宇宙ステーション時代には、必要な船外作業が従来に比して飛躍的に増加することが想定され、どうしても再生型の二酸化炭素除去剤が必要になってくる。現在その有力候補として研究が進められているものに酸化銀がある。表2から、二酸化炭素吸収能力は使い捨て型の水酸化リチウムに遠く及ばないものの、反応生成物である炭酸塩の分解温度が他のものに比べて極めて低く、再生操作が容易であることも分る。基本的な反応は、

の様であり、中程の二酸化炭素と水酸基の反応が律速過程となっている様である。また、反応中H₂Oが重要な役割を果たしており、少なくとも反応初期に於いては、ある程度の湿度が反応効率に大きく影響することも分ってきている。筆者らのグループも酸化銀の基本的な吸脱着能力、再生温度と再生時間の関係、ペレット化等について研究を進めておりその一例を図18に示しておく。

6. む す び

以上、船外活動服システムの技術現状について、筆者等の最近の研究成果も含め紹介した。読者の技術的興味を喚起することができれば幸いである。現在2000年頃建設予定の国際宇宙ステーション、更に月面基地建設、火星有人探査等の大型プロジェクトが、進行/構想されている。船外活動システムの観点からは、重力の有無、レゴリス（月表面を覆う細かい砂土壌）の存在等、様々な運用環境を想定しなければならず、今後更に休究開発が進められることとなろう。いつの日か、日本製の「宇宙服(?)」を着た日本人宇宙飛行士が月面を、火星を歩き回ることを夢見ている。

〔文 献〕

- 1) 新田慶治, 木部勢至朗:「宇宙で生きる」, テクノライフ選書, オーム社, 1995.
- 2) コシノジュンコ他:「ファッションと化学」, 1億人の化学, 大日本図書, 1992.
- 3) 木部勢至朗, 新田慶治: 宇宙服技術の現状と今後の課題, 日本航空宇宙学会誌, 第38巻, 第443号, 1990, pp. 627-634.
- 4) Bradford R. Prouty, Richard C. Wilde and Michael Gan: Evolution of the Extravahicular Mobility Unit for Future Missions, SAE paper 911349 (1991).
- 5) Robert J. Cusick: Development of a Regenerable Metal Oxide CO₂ Removal System, SAE paper 901430 (1990).
- 6) Nicogossian A. E. and et al.: Space Biology and Medicine, Vol. II Life Support and Habitability, published by AIAA and Nauka Press, 1993.