

●特集・気圧と気体の障害

宇宙船外活動と減圧症

嶋田和人

Extra vehicular activity and decompression sickness

Kazuhito Shimada
NASDA

緒言

宇宙医学の範疇で減圧症を考えた時にまず想像されるのは、宇宙遊泳(船外活動, Extra Vehicular Activity/EVA)で宇宙服に漏れが生じた場合ではないだろうか。このケースは宇宙飛行活動を計画する実務家にとっても最大級の惨事であることは疑いないが、実際に現在の宇宙船運用で減圧症の発生が懸念されているのは通常の船外活動の手順に関してである。まず宇宙と宇宙船の環境について整理してみることにしよう。

宇宙環境

「宇宙は真空で無重力」というのは生理学的な意味においては正解である。「それで終わりではないか」とおっしゃる方もいらっしゃるであろうが、圧力関係について少し詳しく見てゆこう。「どこが宇宙か?」という問いへの答えからして複数あるのである。

チョモランマ山(8,848m)へは補助酸素なしの登頂が行われるようになってきているが、そのちょっと上、10kmの高度では肺胞中の水蒸気分圧が47mmHg、肺胞酸素分圧が40mmHg、大気圧が190mmHgとなり、これ以上の高度では肺胞酸素分圧を保つには高濃度の酸素の吸入を要する。さらに上昇して15.2km(50,000フィート)では純酸素を吸入しても肺胞内の気体は水蒸気と二酸化炭素だけになってしまい、この高度を生理学的な宇

宙の始まりとする場合がある。このあたりの高度では肺胞酸素分圧を保つために必要な酸素の圧力が100mmHgの程度になり咽頭痛が生じ肺損傷の可能性があるため、部分型または完全型の与圧服の要求が生じる。宇宙服も与圧服の一種である。12.9km(63,000フィート)では肺胞内のガスは水蒸気のみとなり、これより気圧が低くなると体液から肺胞内へ向かって体内に溶存するガスの拡散が始まる(体液が沸騰する)。米国では軍の航空医師であったH.G.Armstrongにちなんでこの高度をArmstrong Lineと呼称している。

運用面からするとArmstrong Lineが宇宙の始まりとしてふさわしいであろう。ただし生命維持装置(Life Support System)を要するという観点からは、呼吸のために酸素を加圧して供給する装置の必要が生じる高度10km近辺以上であれば極端な低気圧という点からは同じであるという解釈も成立しよう。

大気による光の吸収がなくなる高さ(160km)、翼による飛行ができなくなる高さ(76km/250,000フィート)、ロケット噴射の効率が良くなる高さ(30km/100,000フィート)、大気の絶縁特性が変わる高さ(8km)と分野によっても宇宙の定義は異なる。また「宇宙飛行の認定」に関しての要件も各軍・国際機関で定義が異なる。

実験的な半導体製造のためにはスペースシャトルの周囲の 10^{-7} mmHgの気圧でも余計な分子が多すぎるので、円板型の「ちりよけ」衛星をシャトルから発進させて 10^{-14} mmHgの真空度を達成しようとしたプロジェクト(Wake Shield Facility)がある。尚、気温は分子の速度で定義されているため超高空では1000Kを越す温度になる場合があるが、分子の数が少ないので宇宙船がそのために加熱されることはない(宇宙船の温度は放射の出納量と内部発熱量でほぼ決定される)。

*宇宙開発事業団宇宙医学研究開発室

放射線の強い場所をなるべく通過しないために、有人宇宙船が飛ぶ軌道は静止衛星（高度36000km）などに比べると相対的に低く、ミール宇宙ステーションでは300から400kmを使用している。国際宇宙ステーションの軌道は高度400kmに予定されている。スペースシャトルでは1996年に若田飛行士が搭乗したSTS-72の場合で460km、毛利飛行士や向井飛行士のフライトでは約300kmであった。

減圧症の症例

残念なことに宇宙環境への暴露による減圧症の症例が存在するので最初に御紹介しよう³⁹⁾。患者はG.Dobrovolsky, V.Volkov, V.Patsayevの3名。3名の転帰は死亡。1971年6月6日のソユーズ11号宇宙船による打ち上げ後、3名の飛行士は3週間のサリュート1号宇宙ステーション滞在を終え地上に帰投するためにソユーズ宇宙船に乗り移り、1971年6月29日にソユーズは宇宙ステーションから分離した（火災があったのではないかという噂もあるが不明確）。3名のうち事前に飛行経験があったのはVolkovのみであり、本来の予定乗員のうち1名が打ち上げ2日前に医学的に不適格とされたために急遽バックアップ・クルーとして3名が搭乗したものである。ソユーズの船内は基本的には1気圧、窒素78%、酸素21%である。この時期のソユーズでは船内用の与圧服は使用していなかった。彼らは手順通りソユーズの帰還カプセルから他の船体を切り捨てたが、この際に12の火薬分離ボルトが順序よく発火せず一度に発火してしまったため、頭上ハッチ中央の圧平衡バルブが開いてしまった。このバルブは本来着地前にパラシュートが開いてから開き、宇宙船内外の圧力を平衡させるように設計されていたものなのだが爆破ボルトの衝撃のため高度168kmで開いてしまったのである。事後の解析によれば時間経過は以下の通りであった。

減圧開始 1気圧（モスクワ時1971年6月
30日01：47）
30秒後 カプセル内気圧ほぼ0に到達
15分後 大気上層に到達しカプセル内圧
力上昇開始
30分後 カプセル着地（02：17）

宇宙船では空気の噴出による船体の異常な回転を

検知したオートパイロット装置が回転を止めるべく姿勢制御ロケットを作動させ始めた（アポロ13号の場合と同様である）。乗員は事態を理解し行動を取っていた。Patsayevはハーネスを緩め、右手をいっばいに伸ばしてバルブを閉めるためマニュアル・ノブを回し始めた。しかし回せど回せど空気の流出は続く。人間工学的配慮が欠けた設計だったため、このマニュアル・ノブが役目を果たすべき時に、閉鎖まで至るには60秒も回し続けなければならなかったのである。船内環境維持装置は自動であるので減圧に即応したが、記録によれば11分半ほど気圧がほぼゼロの状態が続いた。

地上2mで正常に逆噴射ロケットが作動し、地上回収チームはいつもと全く同じにカプセルのハッチを開けたのだが一見正常に見受けられた乗員は動かなかった。病理診断は肺塞栓。事故当時はアポロ・ソユーズ計画の前であったためNASAにも報告があり、「11分半の真空暴露・血液の沸騰による組織破壊は瞬間的な急減圧による障害と区別しにくい」との記述があるという。

現在のソユーズでは船内でも与圧服を使用するように変更された。米国のスペースシャトルも定常運用に入ってから船内では与圧服を使っていなかったが、1986年のチャレンジャー事故後から再び使用するようになった。

確認されている減圧症例ではないが、ジェミニ・アポロ宇宙船でも膝痛を訴えた飛行士が1名いたという。但し公式の報告ではない。これらの宇宙船では100%酸素が船内・宇宙服内で使用されていたため、地上の気圧から打ち上げ後に船内の設定気圧（0.34気圧、減圧比2.94）に移行する部分が減圧症防止のために問題であり、対策として打ち上げ前に100%酸素をマスクで3時間吸入して脱窒素する方法が採用されていた。宇宙服の内圧は0.25気圧であり、船外活動へ移行する際の減圧比は1.36でリスクは低いと予想され、実際にも非公式の1例を除いて減圧症の報告はなかった。但し飛行資格の喪失の可能性のために、飛行に関し何か症状を訴えることはシャトル以前にはかなり抵抗があったとされる事を考慮しなければならない。シャトルでは再圧治療のためには宇宙服そのものを使用し、0.54気圧のバルブ（Bends Treatment Adapter）を取り付けて圧を制御する手順になっているが、まだ使用されたことはない（図1）。

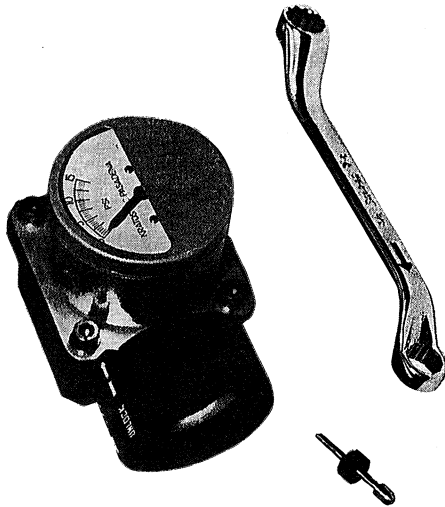


図1 ベンズ治療用宇宙服アダプターキット
スペースシャトル用宇宙服(Extravehicular Mobility Unit)に付加して宇宙服内圧を0.54気圧(8psi)に保持するためのバルブ及び必要工具¹⁰⁾。

地上実験・症例

長距離路線を飛ぶ旅客機の室内は2000メートル以上相当の高度(0.77-0.74気圧程度)になるため潜水の後に飛行すると減圧比では格段に不利となり減圧症の症例も多い。潜水を伴わなくとも軍用機での症例報告は散見される。古来冒険的な高々度飛行による低酸素症の症例は多いが、減圧症として認識されているものは文献に現れにくいようである。但し民間のジェット輸送機における空気塞栓例の報告もあることを考えると¹⁵⁾、減圧症が実際にどれだけ発生しているかの把握は必ずしも容易でないといえよう。

全身を与圧服で覆って高々度飛行に備える試みは古く、世界一周飛行で有名な民間の隻眼パイロット Wiley Post が1930年代に製作したのがその嚆矢である。1950年代に有人宇宙飛行が計画されるようになると、米軍を始め地上で宇宙環境を模擬した試験が数多く実施されるようになった。イヌやサルを急減圧で1~2mmHgの低圧に暴露した実験によると、90秒以内に再加圧した場合には

生存するのが一般的であるという。再加圧の際に圧が50mmHgを越えると膨隆が著しく消退するという。イヌを短時間低圧に暴露した一例では、ボールのように膨らんだイヌが、再加圧した後は尻尾を振ってチャンバーから出ていったそうである。チンパンジーでは9匹を2分半、2.5mmHgに暴露した後では8匹が生存し、神経学的には何も異常が認められなかったという。イヌでは2分間では生存率100%、3分間では20%という報告がある。

低圧チャンバーでの事例でよく引用されるヒトの症例がある。この例はおそらく真空チャンバー内の宇宙服の試験時の事故によるものと想像される。この事故では瞬間的ではない減圧により25mmHg以下の圧力に3から5分間暴露された。患者は生存し、1年後の検査で異常は発見されなかったという。この例から、現在の医療水準なら5分以上真空に暴露されても救命できるであろうという意見もある¹³⁾。

宇宙船・宇宙服内環境

現用の有人宇宙船(スペースシャトル、ロシアのソユーズ宇宙船、ミール宇宙ステーション)では船内気圧は1気圧、酸素濃度も地上と同じ値を基本としているが、これは主に火災対策のためである。米国のアポロ計画の地上試験時にアポロカプセル内で宇宙飛行士3名が焼死した事故があった。この際に船内が1気圧の100%酸素で満たされていたのが事故を大きくした原因の一つであった(軌道上では0.34気圧)。事故後にこのカプセルはアポロ1号と命名された。スカイラブ宇宙ステーションでは0.34気圧、酸素70%、窒素30%であった。

宇宙船が特異的なのは船内大気が循環される閉鎖環境にある事である。これは閉鎖型の麻酔器や潜水器と基本的には同じであり、代謝により放出された二酸化炭素は水酸化リチウム等の吸着剤か、加熱・真空暴露による放出と吸着を繰り返す装置で循環系統から除かれる。宇宙服のシステムも同様である。但し宇宙船内ではヒト呼気中の物質だけでなく、搭載器材からの有毒物質や便臭の放散などもあるため環境を清浄に保つのに多大な注意を払わなければならない。現在のスペースシャトルではトイレの臭いは多段のフィルターで効

果的に除去されているそうである。宇宙では火災が最も恐ろしい事故であるのは再圧治療施設と同様であるが、空気が循環することにより条件はさらに厳しくなっている。例えばテフロン系統の電線被覆材料が30cmほど燃えただけでも搭乗員の中毒の可能性を考えなければならない。これはスペースシャトルでプリンタのケーブルが燃えた事故の後、実測を交え詳細に検討されて明らかになった事例である。1997年初めにはミール宇宙ステーション内で補助用の酸素発生缶から火災が生じたが消火器で消し止められた。

船内と同じく宇宙服内も地上と同じ気圧ならばに気体組成が望ましい。しかし宇宙服では手指の細かな運動を妨げずに1気圧に耐える構造の手袋の製造は極めて困難である。国際宇宙ステーション用にJohnson Space Center Zero Prebreathe Suit Mark 3型(剛柔ハイブリッド構造)、Ames Research Center AX-5(全金属構造)の二つの新型宇宙服が検討されたが¹¹⁾、手袋の工学的問題や資金の問題等で開発は中断されている。これらは宇宙服内圧0.54気圧(8psi)を目指していたもので、双方とも使用者は背中側から入る構造である⁹⁾。硬構造を採用した場合には体格の違いにどう対応するかが人間工学的な問題となる。日本では宇宙服関連の研究会はあるが実際的な検討は将来的な課題である。

現在米国のスペースシャトルで使用されている与圧服には3種類ある。一つはLaunch and Entry Suit (LES)。これはシャトルの打ち上げ・帰還の際にキャビン内で着用するものであり、機体から酸素がホース経由で供給される。シャトルに乗り込む前に宇宙飛行士がオレンジ色のLESを着てバスに乗り込むシーンでお馴染みのものである。軌道に乗った時点でLESはすぐ脱いでしまう。LESの脱衣の動作は無重力(正確には $10^{-6}G$ 程度の微小重力)で最初に行う大きな身体動作であるために、宇宙酔いを起こさぬよう、静かに脱ぐように宇宙飛行士はブリーフィングを受ける。二番目はLESの発展型でACESという。ACESはまだ完成済みの数が足りないのでLESも混用されている。三番目が船外活動(EVA)に着用するShuttle EMU (Extravehicular Mobility Unit)である(図2)¹¹⁾¹⁰⁾¹⁶⁾。これは自己完結型の生命維持システムで酸素ホースは要せず、各個人

の代謝量で異なるがおよそ7時間の船外活動を可能にしている(運用規定上は6時間半が最長)。安全確保には別に索を用いる。宇宙服の内圧は0.29気圧で100%酸素を使用する。酸素は59気圧の主タンクから供給され、これは軌道上で再充填が可能である。非常用酸素タンクは395気圧で充填されており地上でのみ再充填可能である。通信は3つのUHF周波数(AM変調)を用いている。音声回線は2重(同時送受可能)であり、さらに心電図と宇宙服のシステム情報(残圧など)が送信される。船外活動時には常に心電図が送信され、ミッションコントロールセンターでフライト・サージャン(航空宇宙医師)がモニターしている。過去に不整脈例があったとされているが、船外活動に特有の不整脈があるという報告はない。EMUは全備重量が119kgに達するものである。打ち上げ・帰還時にはエアロック内に2つあるスタンドに生命維持装置の入ったバックパック部(Primary Life Support Subsystem, PLSS)で固定されている。船外に出るまではスタンドから酸素と電力が供給されている。

AX-5やMk.3の開発の中断後、現在は現用シャトルEMUの内圧を0.34気圧に上げ、肩部分の構造を簡略化すると共に少ないサイズで全員の体型にフィットさせようとするプロジェクトがメーカーにより進められている。現行のEMUは4種の上体部分を基本にそれぞれサイズの揃ったパーツを組み合わせて構成されており、軌道上で多くの搭乗員の体型に合わせるには組み合わせが複雑である。特に手袋は現在でも2万ドルかけて一人一人特注で製作している。尚、シャトル計画の初期にはMan Maneuvering Unitを使用して各宇宙飛行士が自在に宇宙を飛ぶ予定であったが、実際に質量の大きな物を対象に宇宙空間で作業を行った結果ロボットアームなどを活用するのが有利と判断され、MMUは現在倉庫保存となっている。国際宇宙ステーションでは安全索がはずれた場合に備え、1分間の噴射が可能な窒素ガスジェットを装備したSAFER非常帰還推進機が標準装備となる見込みである。また一時期非常脱出装置として気密の個人用ボールに入る案があったがこの案は廃棄され、プロトタイプボールは現在では宇宙飛行士選抜検査で閉所耐性を検査する器具として使われている。

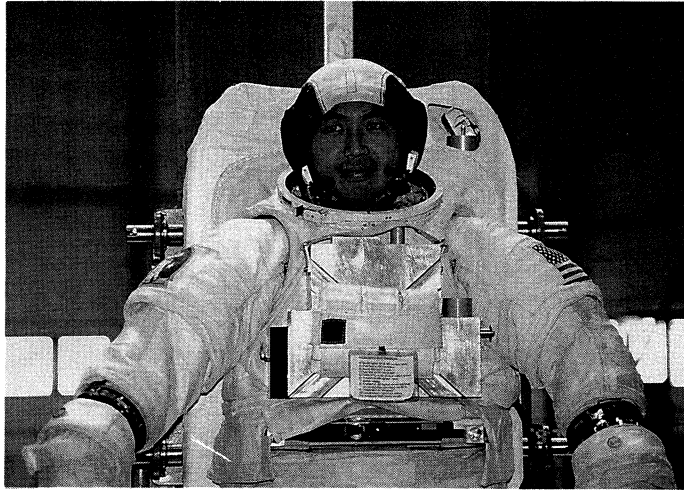


図2 スペースシャトル用宇宙服

バックパック部でスタンドに固定されている。通信キャップ(Communications Carrier Assembly)にはマイクが二つ装備されている。この上にヘルメットを被ると装備は終了する。

[写真: 原 克昌]

スペースシャトルのキャビン(ミッドデッキ。操縦席は2階にある。)から船外に出るためのエアロックは複室式再圧チャンバーの副室の天井が高くなったくらいの大きさである。エアロック内の表示板は全て上下逆であり、これは設計途中でエアロック全体を倒立させる変更を行った名残であるという。スペースラブやスペースハブといった大きな実験室をカーゴ・ベイ(貨物室)に取り付けたり、ミールとドッキングするミッションの際にはエア・ロックにトンネルを接続した形態をとる。1996年末(STS-80)には船外に出る準備が完了し、船外に出る側のハッチを開けようとしたのに開かないという不具合が生じた。原因はロック機構のボルトが一本はずれて引っかかっていたためと判明し、現在改善案が練られている最中である。船外活動はスキューバ潜水と同じく2人一組で行われるが、過去に一度だけ3名で行われたことがある。故障していた通信衛星を船外活動で捕獲するためロボットアームの上に乗った飛行士が専用工具を挿入しようとしたのだが衛星が地上の訓練時とは異なる揺れ方をするために失敗し、3名の飛行士により手袋で掴む案が急遽練られ、地上でシミュレートされた後に実行されたのである。シャトルのエアロック内で3名がEMUを装着するのは空間的にも狭く、手続き的

にも2台の支援スタンドで済ますため困難であったが結局成功し衛星は捕獲された。最初にスタンドから離れたEMUは事前にできるだけ冷却しておいたそうである。最初に衛星が捕獲できなかった理由は、衛星中の燃料が微小重力下で振動する挙動の事前解析が不足であったためともされている。国際宇宙ステーションにはベッドの入るエアロックを装備して再圧治療を行う計画があったが中止され、小さなエアロックが装備される予定である。

ミール宇宙ステーションで現用のロシアのOrlan宇宙服(図3)²⁾はMk.3, AX-5と同様に背部から中に入る方式を取っている⁹⁾。米国とロシアとは宇宙飛行士選抜基準が異なり、米国の宇宙飛行士ではこの宇宙服に入れない者がいる。Orlan宇宙服が特徴的なのは内圧が可変な点で、0.26から0.39気圧、100%酸素で動作する。通常は高気圧側を使用し、微細な作業や力を必要とする作業の際には動きやすくするために低圧を使用するとされる(手首から先のみ減圧が可能とする説明もあるが詳細は明らかでない)。可変圧の機能は生理学的には良いアイデアのように想像されるのだが、伝え聞く所では低圧で動作させることは稀らしい。また、逆にシステムに複雑性を一つ増やしたことで運用上の問題を起こしたことが報告

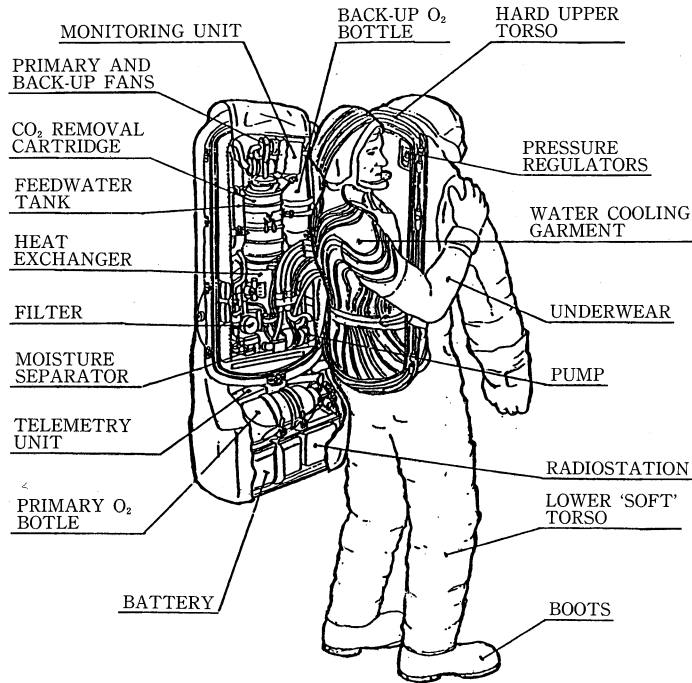


図3 ミール宇宙ステーション用宇宙服

Orland-DMA Space Suit 1992型²⁾。背部から使用者が入る。セミ・リジッド構造。

されている¹⁴⁾。現在の船外活動はロシアでも米国でも二人一組で行われている。ある時ハッチから出ようとした一人のOrland宇宙服の圧設定ノブが何かに引っかかり、意図しない低圧モードに入ってしまった。当人は機械的不具合によるリークで減圧が起こったと思って大慌てで緊急圧力を使用した。結局バディが気づいて圧設定を元に戻して事なきを得たそうである。現行のOrland型は全備重量104kg。1993年にはDornier社(当時)によりOrland宇宙服の進歩型を開発する計画が発表されている¹⁴⁾。

幸い現在までの所では宇宙服に致死的な漏れが生じた事例はない。しかし1991年のスペースシャトル・ミッション(STS-37)では手袋に穴が開いていたことが事後の地上整備中に判明した事例がある⁴⁾(かなり乱暴な使用をしたためだという説もある)。船外活動は6時間に及ぶため、シャトルでは排尿のためにオムツをつけたり(Disposable Absorption Containment Trunk)、飲水バッグ・

チューブや羊羹のような食物を顎の下につけたりしている。この食物が飛び出して目の前に出てくるのを嫌い、大方の飛行士は船外活動の前か後にまとめて食べてしまう。この食物の食べかけが実際に浮遊して手袋の先へ流れ着き(二酸化炭素が停留しないようにヘルメットから送気され手と足から排気されているため)、作業中に握りしめてぐちゃぐちゃになった実例があるそうである。このような些細な不具合でも宇宙では重大な事態を引き起こし得る。米国・ロシアともそれぞれ今までに延べ数百時間ほどの船外活動を実施しているが、現在までの安全記録は周到な地上での準備に負うものであろう。例えば初期のソ連のプログラムでは宇宙用の与圧服の開発のため高圧度の気球からのヒト落下テストを行っている。あるフライトでググル型の装置を装着した被験者がダイブした後に全密閉型のヘルメットを装着した被験者が続いたが、最初の飛び出しのために揺れたゴンドラにバイザーを打ちつけて損傷したままイグジツ

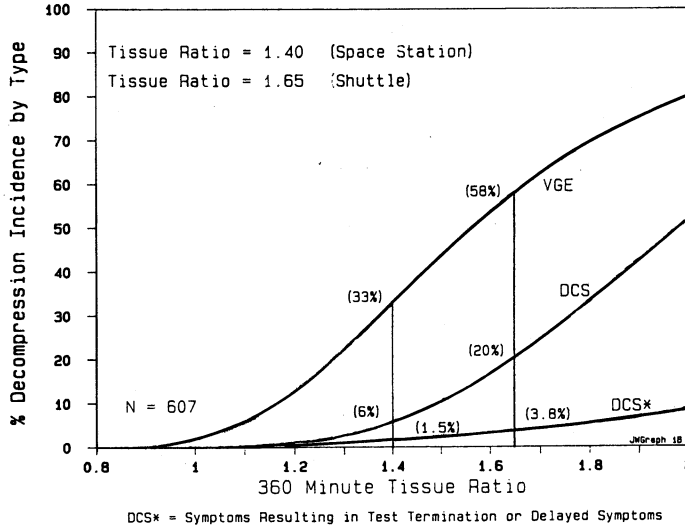


図4 組織減圧比と減圧症発生率

横軸は360分組織減圧比、縦軸は被験者の割合を示す。データはNASA ジョンソン宇宙センターと米空軍航空宇宙医学学校の実験により得られたものを合成してある⁶⁾。曲線は上から前胸部超音波検査による気泡検出率、減圧症の症状の発生率、重度の減圧症の発生率である。スペースシャトルの運用には組織減圧比1.65が基準として採用されている。

トしたために死亡した。この事例を教訓として、以後ソ連・ロシアの宇宙服のバイザーは全て二重構造になったという¹⁴⁾。

宇宙服開発の初期には代謝熱の除去も問題であった。ジェミニ計画では暑さからバイザーが曇ったり作業を中止したりした事例があった。また、ロシアではバイザーの曇りのため作業を中止し、バディがハッチへの帰還を誘導しなければならなかったことがあるという。現在は水冷の下着を着用することによりこの問題は解決されている。熱は最終的には水の気化熱として外界に捨てられる。作業道具の進歩のため作業が楽になり、シャトルの船外活動 (205kcal/h) ではスカイラブの船外活動 (238kcal/h) よりも平均代謝量が減っている¹¹⁾。アポロの場合は熱い月面での熱の除去が問題であったが、シャトルでは日陰での作業が増えてきたため手指が冷えるという問題が新たに発生し、手袋にヒーターを付加することにより解決をみている。

国際宇宙ステーションでは1000時間単位の船外

活動が必要と見積もられており、事故についてもこれまでより格段に分母たる運用時間が大きくなる。船外活動を支援するための医学・生理学・運用技術のさらなる向上が不可欠である。

シャトルでの減圧プロトコル

上述のように、手袋の工学的問題のために現行の宇宙服内の気圧は1気圧より低い。1気圧の潜水服の普及が難しいことと共通点があるのではないか。但し「しんかい6500」等と異なり宇宙では気圧差が高々1気圧であり、針の穴ほどのリークでは致命的になることはない。例えばシャトルEMUのヘルメットにはパーシ用のバルブがあり、これを開けると直径3mmほどの穴が通じ、飛行士が首を回せば「宇宙を直接見る」ことも可能である。この場合の排気流量は1.1kg/hとされている。通常、船内では体内の窒素分圧が地上とほぼ同じ値であるため、宇宙服を装着して生命維持装置を作動させ船外に出ると、設定圧力は0.29気圧であるから減圧比3.42の減圧を経験することと

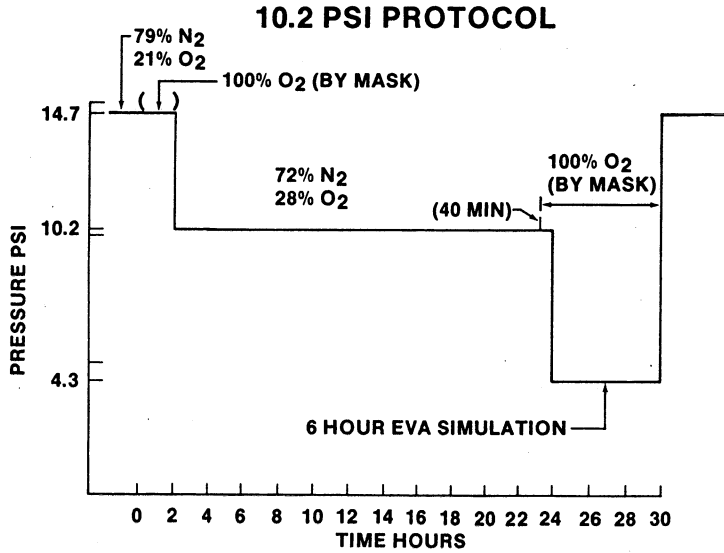


図5 スペースシャトル用減圧プロフィール⁶⁾

船外活動の前に船内圧力を1気圧(14.7psi)から0.69気圧に減圧するための圧力変化プロフィール。このプロフィールにて地上研究が実施され、同じプロフィールで実際の運用が行われている。船外活動要員はまずアスピリン325mgを内服した後100%酸素をマスクで45分以上吸入してから船内気圧を0.69気圧に減圧する。酸素吸入が総計1時間になったらマスクをはずしてよい。次に24時間経過後にエアロックの減圧が始められるように準備し、宇宙服を着用してから40分間100%酸素を吸入する。この脱窒素が終了した時点でエアロックを減圧して船外に出られるようになる。

なり、34mの水深からの急浮上と概略等しい程度の減圧症の発生リスクがある。減圧症発生予防のために米空軍とNASAで低圧チャンバーを用いた地上研究が行われ、症状の報告と前胸部超音波による気泡の測定結果から軌道上での手順が選定された⁶⁾⁷⁾。

まず単純に1気圧で酸素吸入による脱窒素を行った場合には8時間で症状も気泡も現れなかったが、運用の効率から8時間は長すぎるので軽度の症状が約2割、気泡が約5割の被験者で発現する4時間の酸素吸入が基本として選択された。次に、この時間をさらに短縮すべく段階的な減圧法が工夫された。手順の決定には減圧比と減圧症発生の関係が参考にされた(図4)。

段階的な減圧法には様々な組み合わせが考えられるが、宇宙服内圧への移行を開始する船内の圧力は基本的に0.69気圧(10.2psi)が選定された(図

5)。この過程の減圧比は1.44であり、船外活動要員以外が脱窒素を行わなくとも良いという背景などによるものであろう。スペースシャトルでは設計時に0.69気圧を使用することにはなっていないので自動調節機構がなく、1気圧からの減圧は全て手動である。なぜか現在も0.69気圧用の自動バルブは装備されていない。1気圧の維持は自動バルブにより行われる。0.69気圧への減圧の間は一人の搭乗員がかかりきりで1分間に1回圧力を読んで手動バルブの操作を行っている。減圧が終了して目的値ゾーン(図6)に入るまでにはSTS-72の場合でおよそ40分間を要した。船内が0.69気圧の間は圧の維持も手動である。但し船内は若干の船外への気体漏れはあるものの、ほぼ完全な閉鎖環境であるからあまり操作は必要としない。時おり窒素を足して気圧を上げたり、船内空気を少量宇宙へ放出して気圧を下げたりする他

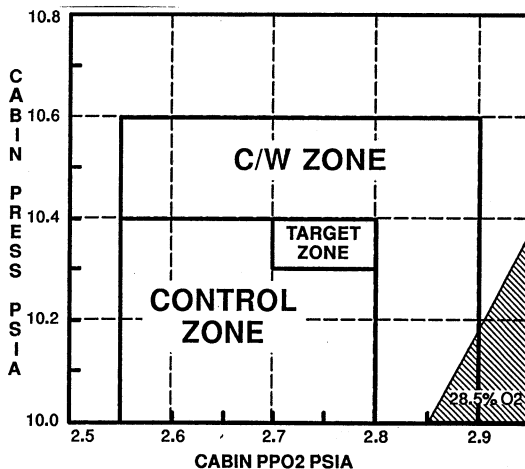


図 6 船内圧力を0.69気圧に保つ際の許容範囲¹⁰⁾

横軸は船内の酸素分圧を、縦軸は船内全圧を示す。目標とする値 (target zone) は酸素分圧が 140mmHg (2.7psia) から 145mmHg (2.8psia), 船内全圧が0.70気圧から0.71気圧であるが, control zone 内が許容範囲である。Caution and Warning zone は警報範囲である。火災対策のため酸素濃度を28.5%以上に上げることは禁止されている。

は、指の径ほどの酸素ノズル（操縦室、船長とパイロットの席の間にある）から少量の酸素が出ているのみである。この酸素量は乗員（最大7名）の代謝量に相当するものであり、誰か乗員が運動器を使用すれば少し増やし夜間睡眠時には少し減らす程度である。

0.69気圧は24時間以上保持する。次に宇宙服を着る。この作業は器材の揃っていることの確認から始まっておよそ2時間ほどを要する。EMUの装着は一人でも不可能ではないが（一人でできなければならないという技術要求がある）、実際的には補助者を必要とする。まずズボンにあたる下半身のユニットをはいた後（微小重力ではこの作業に時間がかかるそうである）、スタンドに固定してある上半身ユニットに下から進入する。下着に張り巡らされている水冷ホースの本幹ならびにディスプレイの電極につながっている心電図のコネクタを上半身側のコネクタに接続する。次に上下のユニットを接続、ヘッドフォンとマイクが二つつづつ付いた通信用キャップを被り、最後がヘル

メット。ここで脱窒素の前に宇宙服内を酸素で8分間バージし窒素を95%追い出す。次に40分の酸素吸入を行う。脱窒素が終了したらエアロックを減圧してゆく。この時点で0.69から0.29気圧への減圧（減圧比2.37）の過程を経る。この減圧時には指で鼻をつまむことができないので、バルサルバ法を行うためにヘルメット内に消しゴム大のクッション (Valsalve device) を貼り付けておく。エアロックの圧がゼロ（宇宙服内は0.29気圧）になったらハッチを開けて船外に出る。

現在のシャトルの手順では0.69気圧に12時間以上、24時間以下しか留まらなかった場合には宇宙服内での脱窒素を1時間15分、酸素吸入開始時の船内気圧が1気圧の場合には脱窒素を4時間行うことと規定されている。運用上の都合で変則的な時間関係になった場合はミッションコントロールセンターのsurgeon席にいる航空宇宙医師が残窒素時間を計算し、組織圧比が1.65以下になるような酸素吸入時間（または待機時間）を算出する。この計算には ATOM というソフトウェアを使用

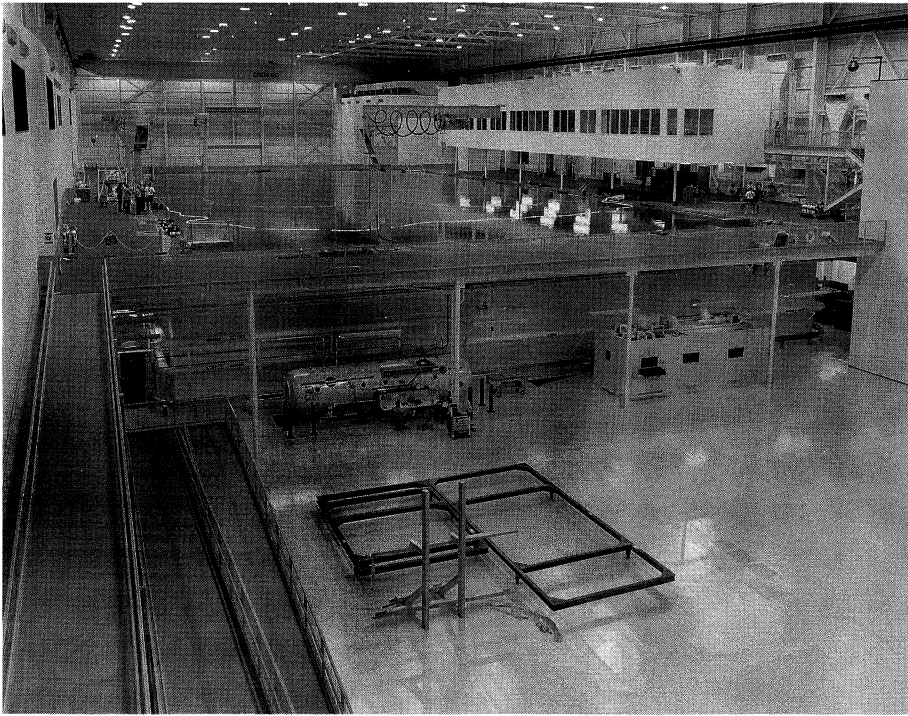


図7 NASA Neutral Buoyancy Laboratory 全景

国際宇宙ステーション計画のため新設された巨大な無重量シュミレーション施設。プールは61.6m×31.1m 深さ12.2m。1階に複室式再圧設備(円筒)と低圧チャンバー(直方体)が設置されている。[写真: NASA]

するが、これはコンソールのワークステーション(DEC Alpha)に組み込まれている。

1997年3月現在、スペースシャトルの船外活動で減圧症が発生した報告はない。ロシアでも発生例はないという。地上実験の結果(図4)によれば何件かの報告があるのが妥当であるが、地上研究による減圧症の予測発生率と実際の船外活動で症例が皆無であることの乖離を埋めるものは何であろうか。これは生理学的に非常に興味のある問題であるが、明快な答えはまだ得られていない。まず、実際には症状が発生しているのだが報告されていない可能性がある。これは飛行士が意図的に報告を行わない可能性も含む。また、地上実験では症状を報告するのが被験者の主な役割であるために軽微なものでも注目されるが、多忙でストレスの多い船外活動時には減圧症の症状が不快感として認識されない可能性がある。もちろん微小重力下ではtribonucleationによる核の生成が少ない可能性などもあるが実証されていない。船

外活動における減圧症の生理メカニズムの解明は依然将来に期待されているものである。

国際宇宙ステーションでは船外活動の頻度が高く、飛行期間が長いため同一人が一飛行で行う船外活動の回数が多くなるために基準の組織減圧比を1.40とする計画である。また、疲労の観点から一回の船外活動の最大時間は6時間以内に減らされる(シャトルでは6時間半)予定である。

無重量シミュレーション

宇宙船外活動はヘルメット潜水作業と類似点が多い。実際プロのダイバー出身者でシャトルの船外活動を経験した者もあり、宇宙での第一声は「こっちの方が眺めがいい」だったそうである。作業の内容にも類似点がある。例えば溶接が主なものの一つであるが、シャトルでも宇宙での溶接の実施が計画されている。

船外活動の体感は地上の水槽でのシミュレーションで良好に再現できるというのが経験者の見解

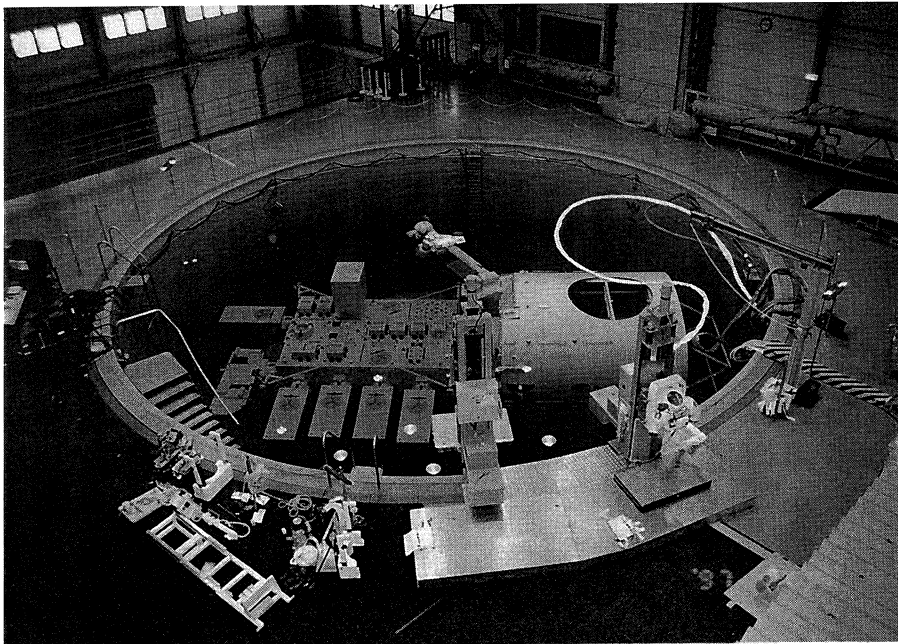


図8 宇宙開発事業団無重量環境模擬水槽

直径16m、水深10.5mの温水プール内に国際宇宙ステーション日本実験モジュールの実物大模型が設置されている。右下には宇宙服を水中に降ろすエレベーターが2基設置されている。[写真：宇宙開発事業団]

であり、NASA、ロシアを始め日本の宇宙開発事業団でも水槽による無重量シミュレーションが実施されている。宇宙でのシャトルEMUに体感を近くするためには水槽内の水圧に0.221気圧を加えた宇宙服内圧を使用するのが良いとのことである。但し水中では重力が働くので、肩などが宇宙服内部に擦り付けられ、宇宙の方が着心地は良いそうである。NASAではヒューストンに国際宇宙ステーション向けの大型施設(Sony-Carter Training Facility/Neutral Buoyancy Laboratory, NBL)を新設し、1997年より運用を開始した(図7)。これに伴いジョンソン宇宙センターの施設(水深7m)は新施設NBLに順次移行、マーシャル宇宙飛行センターの施設(水深10.5m)は1997年中に閉鎖の予定である。NBLは水深12.2mで潜水にはNitroxを採用している。ロシアでは直径23m、深さ12mのプールを使用しており、底が可動式な点特徴的である。

宇宙開発事業団筑波宇宙センターには直径16m、水深10.5mの無重量環境模擬水槽が完成し

ており(図8)、1997年1月から2ヵ月間に渡って若田飛行士を含む6名の飛行士により宇宙服を使用した潜水作業が実施された。この作業では国際宇宙ステーションの日本モジュール(Japanese Experiment Module, JEM)の設計について、船外活動時の徒手保持点の位置が適切か、ボルトを締める工具が入るスペースが確保されているか等の検証が実施された。宇宙服を着た飛行士には安全を確保し作業エリアに誘導するスキューバ・ダイバーが2人ずつ付き添う他、JEMの実物大模型の組立を行うダイバー、写真・ビデオを撮影するダイバーなどその総数が50名ほどになる大規模な水中作業である(図9)。作業の全体の流れは別室のコントロールルームから水中音声などを使用し管理される。

筑波の施設ではプールサイドに複室式再圧チャンバーを設置してある(図10)。これはデマンド型レギュレータを副室に1つ、主室に3つ装備し米海軍の治療表6A(最大5気圧)が実施可能である。NBLではプールサイドが2階、再圧室は1階

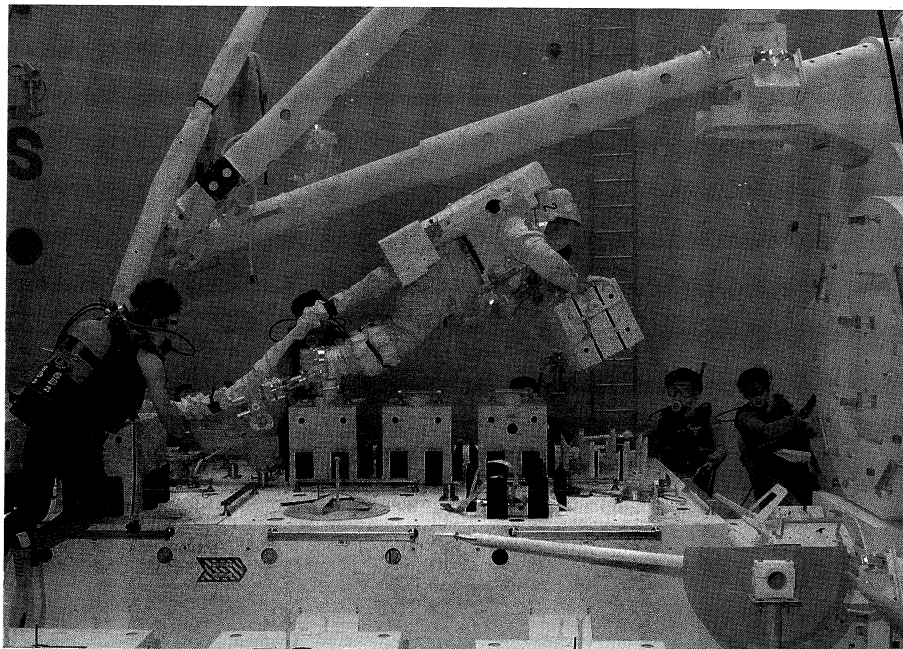


図9 無重量環境模擬水槽作業

1997年1月に筑波宇宙センターにて実施された検証試験にて宇宙服を着た日本人飛行士が作業を行っている。支援スキューバ・ダイバーのうち2名が宇宙服着用者に付き添って安全確保と位置の誘導を行う。[写真：宇宙開発事業団]

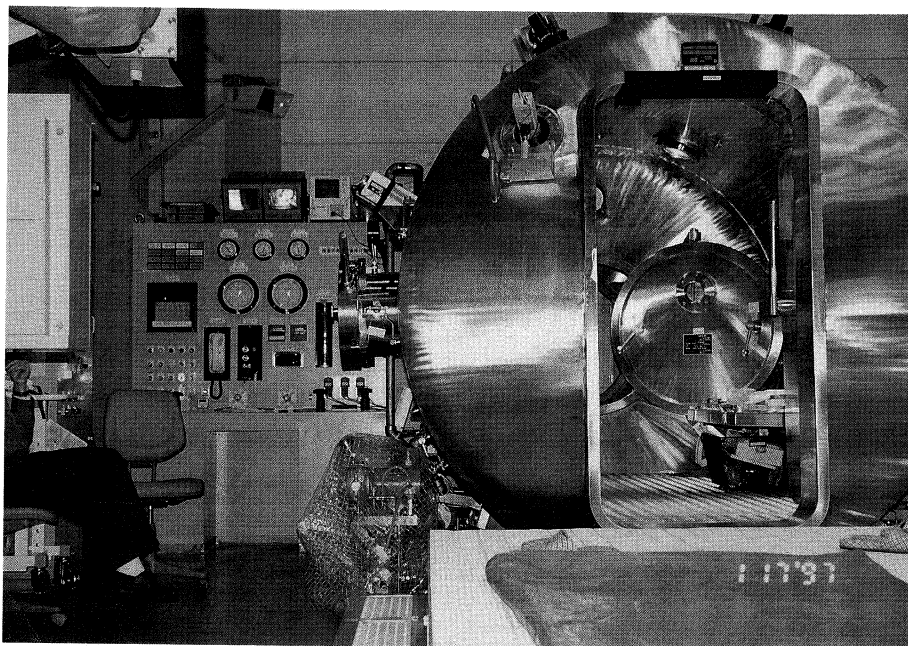


図10 無重量環境試験棟内の複室式再圧治療設備

無重量環境試験時に空気塞栓等が発生した場合に備えて主室内にデマンド型レギュレータを3つ備えた再圧室が筑波宇宙センター内に整備されている。宇宙服着用者は2.2m相当の宇宙服内圧を水深に加えた圧力に暴露されている。[写真：宇宙開発事業団]

で、患者はスロープで搬送する。また、低圧暴露訓練に使用する低圧チャンバーも近傍に再圧チャンバーを必要とすることから同じ場所に設置されている。筑波においても低圧チャンバーは再圧室と廊下で接続されている。

ジョンソン宇宙センターでは30年間無重量シミュレーションをしてきたが、ダイバーの訓練中にインストラクターが溺れかけた他は事故らしい事故もなく、再圧施設もダイバーのためには使用したことがないそうである。マーシャル宇宙センターの施設もダイバーのために再圧施設を使用したことはないという。地上シミュレーションでの減圧症発生防止対策は延潜水数の多きから、実際の船外活動での減圧症の発生予防に匹敵する重要性を持つといえよう。米国には潜水士の卵円孔開存を除外するために静脈に造影剤として気泡を注入する bubble contrast echocardiography を施行している施設があるが、疾病の予防に効果があることが判明すればこのような新手法も導入の可能性を検討する必要がある。

結 語

サイエンス・フィクションとして秀逸な「2001年宇宙の旅」という1968年公開の映画をご覧になった方が多いであろう。この中で、宇宙服のヘルメットをはずした主人公が14秒間ほど真空中に曝されるシーンがあるのだがご記憶にあるだろうか。筆者は一時まで生理学的考察が不足したシーンだと思っていたのだが現在では逆に、優秀なコンサルタントがついていたに違いないと考えている。現実の2001年には映画に出てくるドーナツ型の宇宙ステーションは残念ながら完成していない。しかし、国際宇宙ステーションの建設が盛んに行われている予定であり、そこに日本人が参加しているというのは映画の上映された時には想像もできなかったすばらしいことではないだろうか。

【参 考 文 献】

- 1) 関口千春. 宇宙服の基本構造と生理的問題. 宇宙航空環境医学. 1991; 28: 1-10
- 2) Abramov IP. The experience in operation and improving the Orlan-type space suits. 10th IAA Man-in-space symposium, Tokyo. 1993
- 3) Casey SM. Return from Salyut. In: Set phasers on stun. Aegean, Santa Barbara. ISBN 0-9636178-7-7. 1993
- 4) Dowell GL. Rationale for a hyperbaric treatment capability at a Lunar station. Aivat Space Environ Med. 1993; 64: 243-6
- 5) Harvey B. The Russian space programme. John Wiley and Sons. ISBN 0-471-96014-4. 1996: 100-105
- 6) Horrigan DJ, Waligora JM, Gilbert J et al. Decompression in space. In: Vann RD. The physiological basis of decompression. Undersea and Hyperbaric Medical Society. 1987: 425-437
- 7) Kumar VK, Billica RD, Waligora JM. Utility of Doppler-detectable microbubbles in the diagnosis and treatment of decompression sickness. Aivat Space Environ Med 1997; 68: 151-8
- 8) Lillian DK. U.S. space gear. Smithsonian Institution Press. ISBN 0-87474-459-8. 1994
- 9) NASA. A Russian Space Station: The Mir complex. NASA-TD501. 1994
- 10) NASA. EVA prep/post training Workbook. JSC-23901. 1989
- 11) Powell MR, Horrigan DJ, Walligora JM, Norfleet WT. Extravehicular activities. In: Nicogossian AE, Huntoon CL, Pool SL. Space physiology and medicine 3rd ed. Lea & Febiger ISBN 0-8121-1595-3. 1994
- 12) Shifrin CA. NASA to evaluate two suit designs for space station. Aviation Week and Space Technology 1998; Jan. 11: 36-39
- 13) Stegmann BJ. Considerations for the survival of ebullism. M. Sci. thesis, Wright State Univ. 1989
- 14) Skoog AI, Abramov IP. EVA2000-A European/Russian space suit concept. 10th IAA Man-in-space symposium, Tokyo. 1993
- 15) Veronneau SJ, Mohler SR, Pennybaker AL, Wilcox BC, Sahiar F. Survival at high altitudes: wheel-well passengers. Aviat Space Environ Med. 1996; 67: 784-6
- 16) Wilde RC. Preparing EMU for Space Station. IAA-T-1706. 1993