

●シンポジウム：高圧・低圧で発症する減圧症について

船外活動に伴う減圧による減圧症

嶋田和人*

国際宇宙ステーションの建設と維持のためには長期に滞在する乗員グループ毎に12回の船外活動を可能にする必要がある。実施頻度が急激に増加することからこれは「船外活動の壁」と呼ばれている。宇宙服の中は工学的な限界のために低圧にならざるを得ず、船外活動の前には何らかの脱窒素操作が要求される。国際宇宙ステーションでの船外活動の頻度を支援するためには、実績は高いが時間のかかるスペースシャトル用の脱窒素手順は使用できない。そこでNASAは1997年から船外活動前脱窒素時間低減プログラムを始動させた。これは向こう5年間に200から300の低圧被験者を用いる地上研究である。三つの研究センターが参加している。宇宙開発事業団では国際宇宙ステーションのパートナーとして、PRPによって生じる新しい脱窒素方法を理解して行かねばならない。現在宇宙開発事業団ではPRPのデータを評価し、自身の参加について論議を行っている。

キーワード：船外活動，国際宇宙ステーション，減圧症，静脈空気塞栓，超音波ドプラー

Decompression Sickness during Extravehicular Activity on the International Space Station.

Keywords :

Extra vehicular activity
International space station
Decompression sickness
Venous gas emboli
Ultrasound doppler

1. はじめに

2000年10月31日にバイコヌール基地からソユーズで打ち上げられた宇宙飛行士（米国人1名、ロシア人2名）の搭乗したソユーズ宇宙船は11月2日に国際宇宙ステーションにドッキングした。彼らにより国際宇宙ステーションでの長期滞

在が開始された。10月30日は、誰も宇宙にいなかった最後の日として歴史に刻まれるであろう。

このドッキングの際の国際宇宙ステーションは主要区画が三つだけの初期形態であった。最終形態に向けてさらに日本の実験棟「きぼう」など多数の区画を追加し既存の装置の維持をするためには、一組（初期3名、のち7名）の乗員が4ヶ月間ほど滞在する間に1回あたり6時間の船外活動（Extra Vehicular Activity, EVA）を12回実施できる要求がある。この回数は国際宇宙ステーション以前の米露の宇宙計画に比べ極端に多いものであり関係者は回数が増加が急なことから「船外活動の壁」と呼んでいる。日本人でも土井飛行士に2回の船外活動の実績があり宇宙開発事業団にとっても船外活動は大きな影響がある¹⁾。構造上の問題、特に手袋の操作性の点から宇宙服の内圧を1気圧にすることは依然困難である²⁾。このため船外活動の開始には1気圧（国際宇宙ステーションでは酸素21%、窒素79%）の船内から低圧の宇宙服内への減圧が不可避であり、医学生理学的な運用方法と減圧症（想定する対象は脱

*宇宙開発事業団・宇宙医学研究開発室

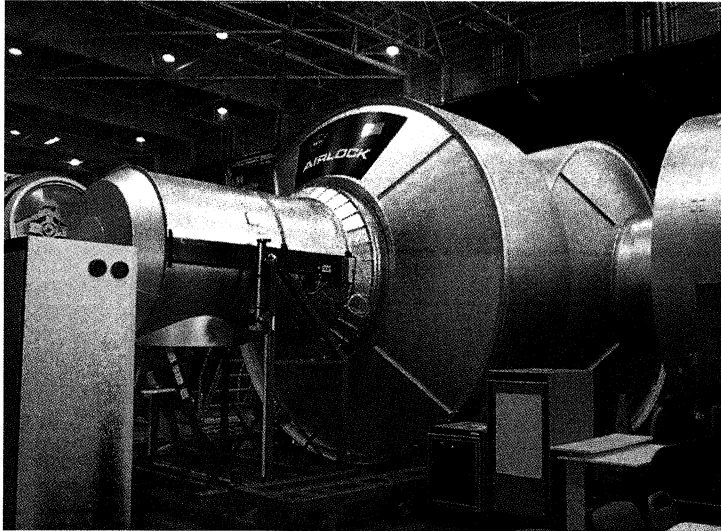


図1 国際宇宙ステーション共用エアロックの実物大模型（外観）

ジョンソン宇宙センターに設置されている模型。細い円筒部分が宇宙に出るためのエアロック部である。

窒素の方法に起因する Decompression Sickness) への対策法も打ち上げと並行して開発中である。以下、これらの状況を概観する。

2. 船外活動前の脱窒素法の現況

執筆時点では船外活動を含む軌道上での減圧症の報告はない。再突入の際には1971年にソユーズで帰還カプセルのバルブの誤作動により3名が急減圧・低酸素で死亡する事故があった³⁾。

ロシアではサリュートとミールの両宇宙ステーションで豊富な船外活動の実績を持つ内圧0.39気圧のOrlan-M宇宙服を国際宇宙ステーションにも使用する。現用の国際宇宙ステーション飛行規則ではOrlan宇宙服の場合、73 kPaで航空用マスクによる純酸素呼吸30分が脱窒素要求である。NASAで減圧のモデルに使用している、窒素半減期360分間のヒト組織の想定を適用すると組織減圧比は1.9程度である。

NASAではスペース・シャトルの運用前の地上実験で減圧症発症が20%であった組織減圧比1.65をシャトル飛行規則として採用した⁴⁾。シャトルの宇宙服はほぼ国際宇宙ステーション用米国宇宙服と同じ構造であり内圧は0.29気圧である。シャトルの船外活動の運用実績では現在まで平均組織

減圧比1.58の脱窒素が実施されている。

脱窒素の方法は窒素分圧、時間長の組み合わせで各種考えられるが、国際宇宙ステーション飛行規則で米国の宇宙服(EMU)用に現在採用されている方法はシャトルでの方法を準用し、①1気圧から出発し4時間の純酸素を宇宙服内で吸入、または②1気圧から純酸素吸入をしながら0.69気圧に減圧、マスクをはずして0.69気圧に10時間滞在して再度1時間純酸素マスク呼吸、0.69気圧滞在が12.5時間になったら宇宙服の中で30分純酸素呼吸、の2種である。

上掲①の方法では船外活動を含めると宇宙服の中に計10時間入っていないと、シャトルでも現在は利用されていない。②の方法では国際宇宙ステーションでの0.69気圧の維持のため2人1組の船外活動乗員がエアロック内に宿泊する必要がある(campout)(図1・2)。乗員の配置が分断されるため特に初期の乗員3名の時期には緊急時の対処などに問題がある。一日あけて翌々日に船外活動を行う要求も満たすのが難しい。またエアロック内では食事や尿尿処理にも手間がかかる。

国際宇宙ステーションでは米露両方の船外用宇宙服が使用できるエアロックを備える予定で、両

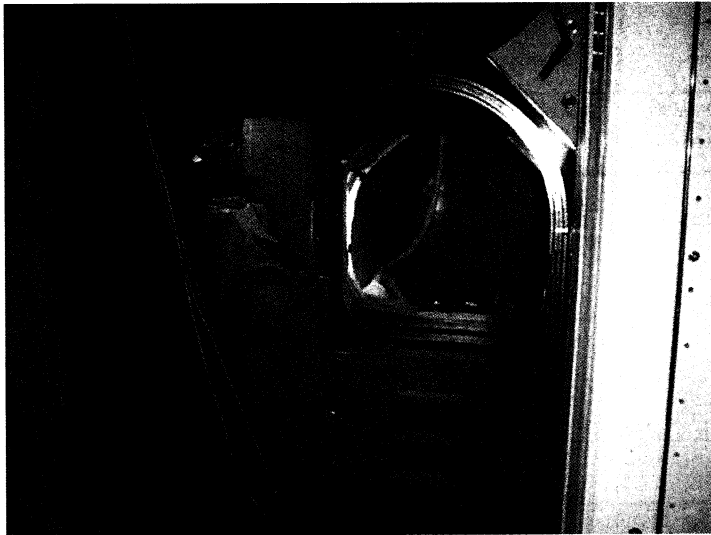


図2 国際宇宙ステーション共用エアロックの実物大模型（内部）

手前の区画は宇宙服などの収納場所である。従来のシャトルの脱窒素手順を適用するとこのエアロックの中に2名が一晩泊まらなければならない。2時間の脱窒素では運動や用便中にも酸素吸入をするため長い酸素ホースを要す。

方を混用する場合の規則は未設定である（2000年3月15日版）。

3. 脱窒素法の開発研究

スペース・シャトルで実績のある船外活動前の脱窒素方法は82回の船外活動（延べ164名）で無症例である点すばらしいが、運用要求の厳しい国際宇宙ステーションの船外活動のためには能率が悪い。また国際宇宙ステーションのエアロックは減圧の際に大気を2/3ほどは回収できるものやはり酸素・窒素の損耗がある。そこでNASAでは減圧症の研究者で船外活動の経験のある飛行士のMike Gernhardt, Ph.D.らを中心に1997年にPre-breathe Reduction Program, PRPを立ち上げた⁵⁾⁶⁾。目的は脱窒素時間の短縮と宇宙での減圧症の理解の促進である。5年間・地上検証200～300例程度を目処としており、脱窒素時間をまず2時間、さらに可能なら1.5時間程度に短縮することを目標としている。また船外活動中のモニターとして宇宙服中の超音波ドップラーによる静脈系の泡の測定を目指している。

脱窒素時間の短縮の可能性を示唆するものとして、①シャトルでは地上検証による減圧症罹患率

20%の予想に反し症例が出ていないこと、②地上の低圧室で宇宙服を着た場合には布の服よりも減圧症が少ないこと（NASAでは前者で2%、後者で25%。ロシアでは前者で0%、後者で25%。運動制限の差異が理由として考えられる。）、⁵⁾、③歩き回らない“adynamia”の被験者では減圧症が少ないとするPowell Mらの理論⁵⁾、④脱窒素中に運動すると減圧症が少なくなるという報告⁷⁾、などがある。

NASAでは国際宇宙ステーションの組みたての予定手順に対し船外活動中の減圧症の発生が与える損害と脱窒素時間の短縮による利益を比較し、減圧症の発生率が15%であればPRPの推進の価値があると判断した。医学運用関連の研究としては異例に早い段階で飛行士・管制官・エンジニアに内容の重要性が周知され理解された点、特筆に値する。NASA施設では実験の実施が困難であるため、テキサス大学Hermann病院・Duke大学・カナダ国立環境医学研究所（DCIEM）にマルチセンター実験の実施が委託された。

実験用脱窒素プロトコルは現在までに4種が検定された。いずれも2時間の航空用マスクによる純酸素吸入と、宇宙服の着衣を模擬するための

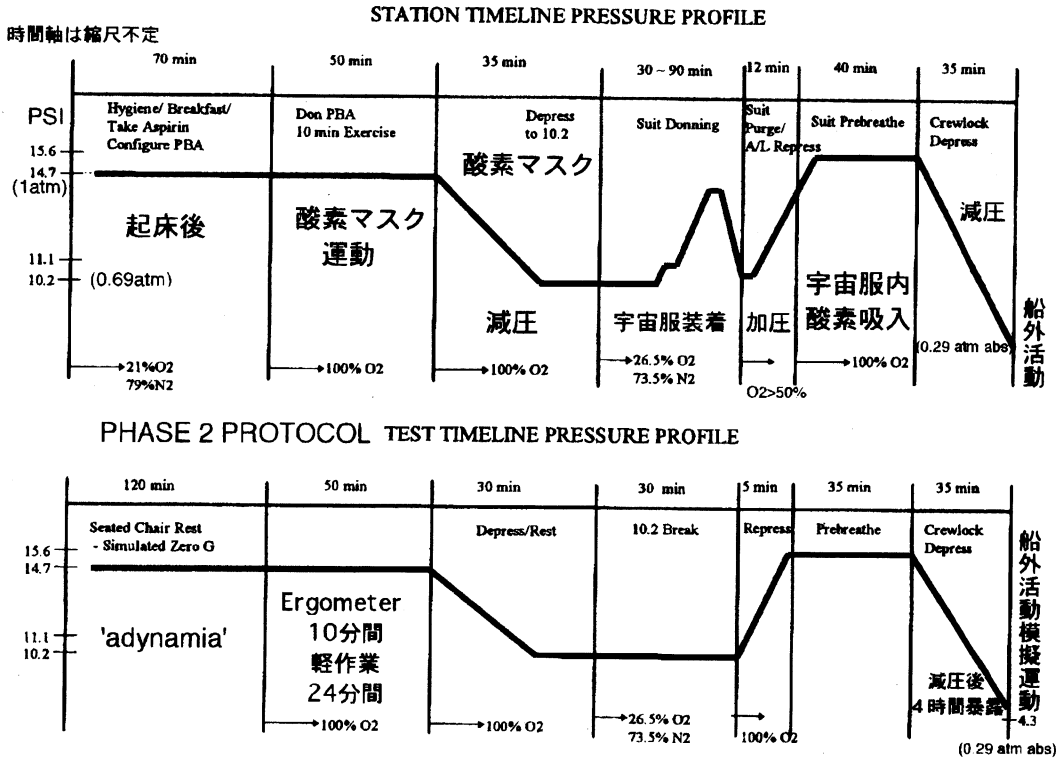


図3 国際宇宙ステーション用2時間脱酸素プロトコル⁵⁾

Prebreathe Reduction Programで選定された第2プロトコルを国際宇宙ステーションに適用した場合の圧経過を上段に、地上検証用の圧経過を下段に示す。下段では軌道上でより安全になるように圧と時間に余裕を見こんでいる。船外活動模擬運動は軌道上の実際の6時間より短く4時間であるが、これは殆どの場合4時間以内に症状が発現することに基づくという。

0.69気圧・酸素26.5%への30分間の暴露を含んでいる。運動量が各プロトコルで異なり、Phase 1プロトコルでは75%酸素摂取量での手足のエルゴメータ10分間、Phase 2では75%酸素摂取量での手足のエルゴメータ10分間に加え24分間の活動準備作業(160-253 kcal/h)、Phase 3では24分間の活動準備作業のみ、Phase 4では56分間の活動準備作業のみを负荷した。運動负荷・低圧负荷の時間経過を(図3)に、運動装置を(図4)に示す。ドップラーによる肺動脈気泡の測定は16分おきに4分間ずつ繰り返し実施された。

PRPの実験仮説は「あるプロトコルについて減圧症15%以下(95%信頼区間)、かつGrade 4のドップラー気泡観測20%以下、かつタイプ2減圧症例なし」を満たすことである。被験者は飛行

士と年齢・性別・最大酸素摂取量・Body Mass Indexを合わせるようにし、実際にはPhase 2プロトコルの例で8歳ほど飛行士より平均年齢が若く(飛行士平均41.9歳)、最大酸素摂取量がやや少ない者となった。(表1)に結果の要約を示す。

表中の四つのプロトコルのうち仮説の条件を満たしたのはPhase 2プロトコルのみであったため、これを飛行規則に取り入れる作業が進行している。Phase 3はタイプ2減圧症が1例発生した時点で打ち切られた。この症例は卵円孔開存のある被験者であった。

表1以外の結果として、①減圧症と性差は相関がなかった、②女性はGrade 4の気泡が有意に少なかった、③酸素消費が多いと有意に減圧症と気泡が少なかった、④年齢が高いとGrade 4気泡の

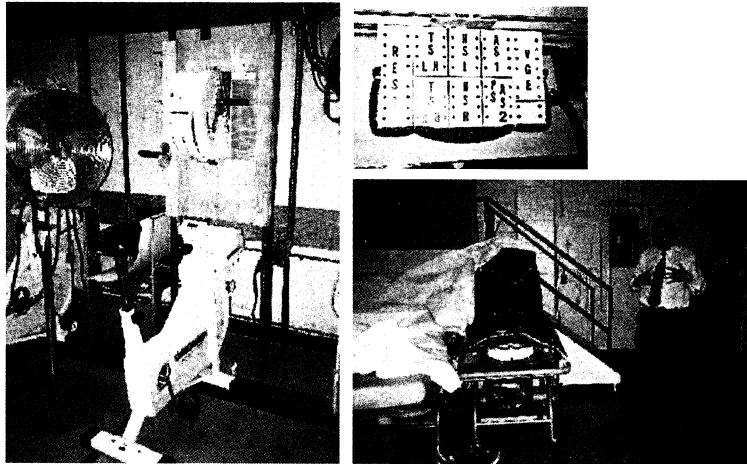


図4 Prebreathe Reduction Program 第2プロトコル用運動装置

Prebreathe Reduction Programは三つのセンターによる共同研究である。第2プロトコル用にカナダ国立環境医学研究所(DCIEM)で使用した装置を写真に示す。左は酸素吸入時の運動のための手足用エルゴメータ。右上は被験者に次の動作を指示するための低圧チャンパー内の電光表示。右下は船外活動を模擬するために臥位で4時間運動を負荷するためのバンジー運動器具。

表1 マルチセンター地上実験結果要約⁸⁾

プロトコルNo.	N	DCS(%)	気泡有(%)	Grade4 気泡有(%)
Phase 1	47	19	49	4
Phase 2	45	0	31	6
Phase 3	10	20	20	10
Phase 4	57	14	40	12

率が高い傾向がある、などが挙げられている。

4. 軌道上での減圧症の治療

現在までに軌道上で減圧症を治療した報告はない。PRPに基づく脱窒素では減圧症発生率15%を基準としており今後の飛行では減圧症発症の可能性が高い。運用時の減圧症対処方法策定には飛行士が減圧症を報告した場合に不利に扱われることがないように配慮することが重要である。

潜水後の減圧症と異なり海面圧から低圧に移行して海面圧に戻る間に生じる減圧症は、海面圧に戻った時点で症状が消失することが多い。NASAの文献調査では中枢神経系症状または明らかな心肺症状がなければ海面圧の酸素吸入で98.6%以上

の症状が消滅したという。低圧により発症する減圧症は潜水後に海面圧で発症する減圧症と生理学的に大きく異なる点に留意しなければならず、潜水に伴うものに比べて発症率が高いからといって一概に危険度が高いという判断はできない。また低圧に起因する場合は発症しても海面圧に戻ることにより大きな加圧がされるため長期的障害も明確ではない。米国の宇宙服の内圧は高度30,000フィートに相当するが、海面圧に戻ることにより圧比3.4の加圧をされることになる。これは一般的な高圧酸素療法での使用圧である2.8絶対気圧への加圧よりも圧比が高い。U-2偵察機のパイロットは30,000フィート程度のキャビン圧に15時間程度暴露されるため75.5%のパイロットが減圧症

の症状を体験しているが長期的影響は特に認められないという⁹⁾。

軌道上では減圧中、すなわち船外活動中に減圧症が発生することが想定される。そこでNASAでは乗員に減圧症の教育を課すとともに船外活動の手順確認のために宇宙服の手首(cuff)につけてあるノートに減圧症への対処チェックリストが加えられた。Cuff Checklistクラス1症状として、宇宙服との擦れによる痛みと区別できないような関節痛とparesthesiaを分類し、船外活動終了後に地上の航空宇宙医師に報告すれば良いとする。クラス2症状はクラス1症状が強く船外作業能率に影響のあるもの。症状のある飛行士は作業を中断し、残りのパディ飛行士が後片付けをしてから両名が船内に帰る。症状が改善すれば飛行は予定通り続行する。クラス3症状はクラス1症状がさらに重度のもので移動または体幹または多発性のparesthesia、重度の頭痛を含み、症状のない飛行士が患者をエアロックに移動させなるべく早く2名で船内に戻る。クラス4症状は中枢神経症状または重篤な心肺症状を指し、船外活動を中止し必要なら患者を先に船内に返し残りの者は作業場の安全を確保した後船内に帰還する。

いずれのクラスの発症の場合にも治療の選択は地上の航空宇宙医師が決定するが、国際宇宙ステーションの船内を1気圧を超えて昇圧するには制約が多く、また宇宙服の内圧を0.29気圧から0.54気圧に上げるためのBends Treatment Adapterバルブ(BTA)を取り付けるには一度宇宙服の気密を破らねばならず、一旦BTAを使用するとその宇宙服は船外では使用できなくなることから対処法は限られる。(再圧のできるモジュールを用意する計画はなくなり、ポータブルの再圧設備の設置が論議されている。)米空軍で海面圧の酸素吸入2時間が低圧の減圧症の治療に奏効していることから、船内に戻った患者は宇宙服を着せたまま船内圧に2.5時間暴露し(0.29+1=1.29絶対気圧での純酸素吸入)、症状が再燃する場合にBTAの使用を考慮することになる。クラス4以外では飛行の中断は考慮しない。早期の帰還・再圧のため

の許容時間としては10ないし12時間を想定している。

5. おわりに

宇宙機での減圧症への対処は宇宙機の運用と密接な関連があり、体系的な準備が要求される。PRP研究については宇宙開発事業団でその成果を評価し、研究への参加の必要性を議論する予定である。

【参考文献】

- 1) 嶋田和人「船外活動—STS-87から国際宇宙ステーションへ—」日本航空宇宙学会第14回宇宙ステーション講演会・第11回有人宇宙飛行技術シンポジウム講演集 S23-S34, 1998
- 2) 嶋田和人：船外活動の挑戦—宇宙服と運用の最新技術—。日本航空宇宙学会誌 47：191-196, 1999
- 3) 嶋田和人：宇宙船外活動と減圧症。日高圧医誌 29(3)：151-163, 1997
- 4) Powell MR, Horrigan DJ, Waligora JM, Norfleet WT. Extravehicular Activities. In: Nicogossian et al ed. Space physiology and space medicine 3rd ed. Lea & Febiger, Philadelphia, 1994
- 5) Gernhardt M. Development, testing and implementation of a 2-hour prebreathe protocol for space walks from the International Space Station. Aerospace Medical Association luncheon seminar, Houston, 2000
- 6) 嶋田和人：国際宇宙ステーションでの減圧と再圧 関東地区高気圧環境医学懇話会誌 3(2)：93-96, 2000
- 7) Webb JT, Fischer MD, Heaps CL, Pilmanis AA. Exercise-enhanced preoxygenation increases protection from decompression sickness. Aviat Space Environ Med 67(7)：618-624, 1996
- 8) Butler BD, Vann RD, Nishi RY, Gerth WA, Beltran E, Fife CE, Conkin J, Schneider SM, Loftin, KC, Sullivan PA, Acock K, Foster P, Dervay JP, Waligora JM, Powell MR, Gernhardt ML. Human trials of a 2-hour prebreathe protocol for extravehicular activity. Aviat Space Environ Med 71(3)：278, 2000
- 9) Bendrick G, Ainscough MJ, Pilmanis AA, Bisson RU. Prevalence of decompression sickness among U-2 pilots. Aviat Space Environ Med 67:199-206, 1996

(日本宇宙航空環境医学会総会との合同シンポジウムより)