

特 集

特殊な状況での呼吸療法

航空医療搬送における低圧環境下での呼吸療法

山口大介¹⁾・岸本健寛¹⁾・蔵本浩一郎²⁾

キーワード：航空医療搬送, 低圧環境, 気体の法則

I. はじめに

本稿では、より実践的に低圧環境下での呼吸療法について理解を深めていただくために、本邦で多用されている搬送用人工呼吸器のうち特定の機種を取り上げ具体的に解説する。ただし筆者はいずれの人工呼吸器の販売会社などと一切の利益相反を有しておらず、また本稿の意図として特定の人工呼吸器のみを推奨しているものではないことをお断りしておく。

II. 航空医療搬送と人工呼吸

本邦では、2001年にドクターヘリ導入促進事業が開始されて以来、その数は41道府県51機を数えるに至り（2017年現在）、全国的な配備、補完体制が確立されている。生命危機が切迫している重症患者や重症熱傷・多発外傷・四肢切断などの特殊救急疾患の患者をヘリコプター（回転翼機）を用い搬送する際に、その重症度の高さから機上での人工呼吸管理を行う症例は少なくないだろう。

他方、大規模災害においては、被災地内の医療インフラの破綻や医療ニーズの急激な増大から、傷病者に適切な医療を提供するために、被災地外への広域医療搬送をする所要が想定される。この場合、DMAT（Disaster Medical Assistance Team：災害派遣医療チーム）が自衛隊輸送機（固定翼機・大型回転翼機）に搭乗して重症患者の搬送を担当するが、同様に搬送過程にお

いて人工呼吸管理を余儀なくされる症例は少なくないだろう。

総数としては決して多くないかもしれないが、航空医療搬送、特に高高度・低圧環境という地上とは同一でない「異常環境」下での人工呼吸管理について、航空医学的な立場から考察したい。

III. 航空医療搬送の特性

航空医療搬送では、患者のみならず使用する医療機器に対しても、航空機特有の環境因子（気圧・温度・加速度・振動・湿度・照度）の影響を考慮することが求められる。このうち、気圧は呼吸療法を行うにあたり無視することのできない重要な因子である。この気圧を考慮する際に、搬送に用いる航空機が固定翼機か回転翼機のいずれなのか、言い換えれば「その航空機が機内与圧機能を有しているか否か」を認知することが重要である。

我々が空の旅をする際は、多くの場合、大型のジェット旅客機に搭乗することになるが、どんなに高高度を飛行しても気圧の低下やそれによる呼吸苦などはほとんど感じない。これは飛行機の客室の圧（機内圧）を地上の気圧（1気圧）に近く成るように与圧する機能（以下、与圧装置）を有しているからである。

民間航空会社のジェット旅客機同様に、広域医療搬送に用いる自衛隊の固定翼機はそのほとんど全てが与圧装置を有しており、一定の高度までは機内圧は地上の気圧（1気圧）に近い値に維持される。一方、民間問わず全ての回転翼機（テイルローター機も含む）

1) 防衛省航空自衛隊 航空機動衛生隊

2) 同 航空医学実験隊 第3部航空医学科

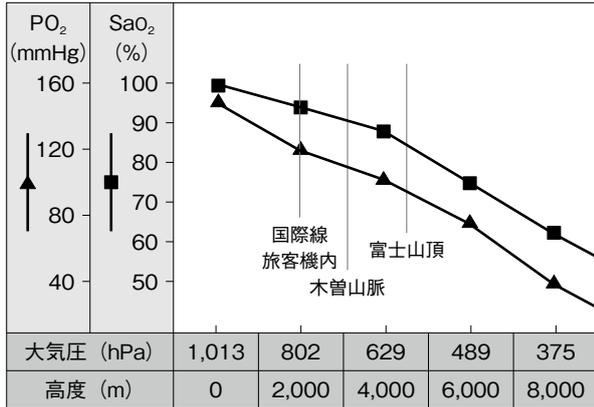


図1 高度と大気中の酸素分圧、動脈血酸素飽和度の関係
 高度の上昇とともに大気中の酸素分圧は低下し、動脈血酸素飽和度も低下していく。与圧装置を有する旅客機でも国際線では機内高度は2,000mまで上昇し(実高度10,000~13,000m)、健康人でも動脈血酸素飽和度は96%程度まで低下するが臨床的には問題になるレベルではない。しかし高度3,000mを超えるあたりから動脈血酸素飽和度は大きく低下しはじめ、臓器の好氣的代謝にも影響が生じるようになる。航空医学的には高度10,000ft(3,300m)までを安全高度と定め、それ以上は健康人でもその高度帯での滞在時間制限や酸素マスクの装着を義務付けている。

は飛行高度が上がるにつれて機内圧は外気の大気圧と同値に低下し、それにしがたい酸素分圧も低下し、呼吸生理学的に危機的な状況に陥る。患者の重症度や航空医学的評価から、搬送に用いる航空機の種類や飛行高度制限(次項参照)を行う必要がある。

IV. 航空医療搬送に係る気体の法則

今から約20年前、本邦における回転翼機を用いた民間航空医療搬送の黎明期に、生体部分肺移植患者を防災ヘリコプターを用いて長野県松本市から岡山県まで緊急搬送した搬送した症例において、最短経路を取るべく高度3,000mの木曾山脈を超えて搬送しようとしたところ、高度補正機能を有した人工呼吸器を装着していたものの、患者が低酸素状態に陥り搬送に難渋した症例を踏まえ、搬送用人工呼吸器の高度補正機能について考察されている¹⁾。これは、高高度における低圧・低酸素が、生体および医療機器に及ぼす影響を与えるかを熟知しておく必要があることを知らしめる教訓的な症例である。航空医療搬送に係る低圧・低酸素について考える時、以下に示す気体の法則が重要となる。

1. ダルトン (Dalton) の法則

高度が上昇すると、気体全体の圧が低下するが、分圧比が一定のまま酸素分圧も低下する。相対的な換気

表1 高度変化に応じて動脈血酸素分圧を一定に維持するのに必要な吸入酸素濃度

必要とする吸入酸素濃度 (%)	100	100				
	90	98	100	Positive Pressure Required		
	80	87	94			
	70	76	82	90	97	100
	60	65	70*	76	83	90
	50	54	59	64	69	75
	40	44	47	51	55	60
	30	33	35	38	42	45
	21	23	25	27	29	32
高度 (m)	0	400	1,200*	1,800	2,400	3,000

高度が上昇するにしがたい、気圧の低下とともに大気中の酸素分圧も低下するため(ダルトンの法則)、吸入酸素濃度を上げて行く必要がある。

- (例1) 地上で60%の酸素を吸入している患者は高度1,200mでは70%まで上昇させる必要がある(*印)
- (例2) 地上で80%以上の酸素を吸入している患者は、高度3,000mでは純酸素吸入でも酸素化は低下してしまうため、陽圧換気(PEEP)の付与が必要である(網掛け部)
(文献2より引用改変)

不足に陥り肺胞低換気となり、かつ肺胞内圧が低下するため、低酸素血症が生じる(altitude hypoxia、図1)。このため低圧環境では、高度0mと同じ酸素化を得るために高度に併せて吸入気酸素濃度(FiO₂)を上げる(=酸素分圧を上昇させる)必要がある(表1)²⁾。またFiO₂の上昇のみで酸素化の改善が得られない時には陽圧換気(PEEPの付与など)が必要となる症例もある(表1内の網掛け部)。

言い換えれば、航空機に与圧装置を有し、航空機が高高度を飛行しても機内圧が低下しなければ、地上と同じFiO₂を提供すればよいことになる。前述したジェット旅客機で我々が呼吸苦を自覚しないのは、与圧装置により酸素分圧がほとんど低下しないからである(正確には与圧装置を搭載している機種でも、飛行中は機体の保護のために機内圧を1気圧以下に低下させるのが常であり、特に国際線などでは高度10,000m以上を飛行するため機内圧が0.8~0.9気圧まで低下することに留意されたい)。余談であるが、広域医療搬送の際には、必ず与圧装置を有する航空機を選択し、さらに機内高度が0mを維持できるように飛行高度制限を機長にリクエストするのも一法である。

2. ボイル・シャルル (Boyle & Charles) の法則

気圧と気体容積の積は一定であり、気温が一定の場合

合、気圧が下がれば気体容積は反比例的に増える（ボイルの法則）。ゆえに低圧環境下では閉鎖腔の気体の膨張が生じる。臨床的に問題となる閉鎖腔として、頭蓋内（気脳症）、歯牙（歯髄炎など）、副鼻腔（副鼻腔炎）、内耳（耳管閉塞による耳痛）、胸腔（気胸・緊張性気胸）、腹腔（胃内ガス・腸閉塞）などがあげられる。これらの閉鎖腔の気体が膨張することにより、脳圧亢進、緊張性気胸、吐物誤嚥による窒息など重篤な病態に陥る可能性がある。また気圧低下による気体の膨張は医療資機材など（点滴ボトル、気管チューブのカフ、人工呼吸器における一回換気量など）でも重要な問題となる（後述）。

併せて気体容積は気体の温度に比例するというシャルルの法則も、一部の人工呼吸器が搭載している BTPS 機能（後述）の理解にも重要である。理想気体におけるボイル・シャルルの法則の式を以下に示す。

$$pV = nRT$$

p = 気圧、V = 気体容積、n = 物質質量、R = 気体定数、
T = 絶対温度

注：湿度が高くなると水蒸気の分子が増えるため n は増加し、気体容積は膨張する⇒BTPS の項を参照

V. 低圧環境における人工呼吸管理（総論）

低圧環境における人工呼吸器の動作に関する論文は複数発表されているが、そのほとんどが、低圧訓練装置（いわゆる低圧チャンバー）を用いて高高度・低圧環境を作り、量規定換気における一回換気量の正確性を評価したものである。

2000 年代以降の搬送用人工呼吸器の多くが高度計を搭載し高度補正機能を有している。高度補正機能とは、ボイル・シャルルの法則により高度変化に伴って生じる気体の体積変化を正確にとらえ、タービンやニューマチック回路を制御することで、患者に供給される一回換気量が正確になるように調整するものである。

ほとんどすべての人工呼吸器のフローセンサー（流量計）は熱式を採用しており、この機構の測定原理は分子量（質量）をモニタリングして換気量を測定している（「体積流量」ではなく「質量流量」を測定している）。ゆえに、もし高度補正機能を搭載していない人工呼吸器を使用した場合には、同一分子量（質量）を含む気体容積はボイル・シャルルの法則から低圧環境下では膨張してしまうため、単位時間あたりにフローセ

ンサーで測定される分子量は相対的に減少する。そのため、量規定換気であればその分子量を一定に保つべく設定した数値よりも過大な一回換気量が提供されてしまうことになる。

例を示して説明する。量規定換気で一回換気量 500mL を供給する場合、高度 0m の地上（1 気圧下 = 1,013hPa）でキャリブレーションされている人工呼吸器は 1 気圧下での「500mL 中の分子量（質量）」を 500mL と容積換算して認識している。この人工呼吸器を高度 2,000m（0.8 気圧 = 802hPa）で使用する場合、温度・湿度が同一と仮定した場合の高度 2,000m における同一分子量（質量）は、

$$500\text{mL} \times \frac{1 \text{ 気圧}}{0.8 \text{ 気圧}} = 625\text{mL}$$

に含まれるため、人工呼吸器は実測値で 625mL を「500mL」と誤認して供給してしまうことになる。

この過大な一回換気量は、気道内圧の上昇と圧損傷を生じる可能性があり、また分時換気量の増大は低二酸化炭素血症、呼吸性アルカローシス、低カリウム血症、催不整脈作用、酸素解離曲線の左方偏位に伴う末梢での酸素供給低下などを生じる。

航空医療搬送で機内与圧を持たないヘリコプターなどで患者を搬送する際には、高度の変化に応じて人工呼吸器の一回換気量を調節する高度補正機能を有する人工呼吸器を用いるべきである。また次項で後述するように高度補正機能の正確性も評価しなければならない。

VI. ベンチマークテストの重要性

従来機種では、地上の 1 気圧の環境下でも一回換気量の供給が不正確な機種が存在^{注1)}する^{3,4)} うえに、さらに低圧環境での高度補正ロジックの性能限界から、一回換気量の供給が著しく不正確・不安定なものが存在する⁵⁾。ゆえに自らが保有し使用する人工呼吸器の性能表を過信することなく、こうした低圧環境下におけるベンチマークテストの結果を参照されたい。

かねてより航空医療搬送には LTV1000/1200 (Carefu-

注1) 従来機種の中には ASTM standard (米国試験材料協会：旧称 American Society for Testing and Materials が定める標準規格、人工呼吸器の一回換気量は実測値が設定値の ±10% 以下を規格範囲内とする) を逸脱するものが多く存在する。

sion Pulmonetics、アメリカ)やOxylog3000(Draeger Medical、ドイツ)などが多用され、2000年代よりこれらの人工呼吸器に対する地上もしくは低圧環境でのベンチマークテストが複数実施された。しかしながら、これらの人工呼吸器の開発も今から20年以上前であり、呼吸器本体は高性能であっても、どうしても高度補正機能の有無や高度補正のロジックの正確さなどにおいて古さゆえの限界を有している。一方、近年は高性能なCPUを搭載し、より精細かつ精緻な生理的換気の提供が可能である、いわゆる“Sophisticated transport and emergency ventilator”と呼ばれるT1(Hamilton Medical、スイス)やMonnal T-60(Air Liquid Medical System、フランス)などの新しい人工呼吸器が発売され、欧米を中心に軍民間わず航空医療搬送で使用されるようになった。そして2010年代にはこうした新機種について評価したベンチマークテストが発表されるようになった^{4,5)}。

詳細は各文献を参照されたいが、旧機種では一般に低圧環境において設定値よりも過大な一回換気量が供給される傾向にある^{1,6~8)}が、近年開発された機種では低圧環境でもほぼ正確な一回換気量が供給されることが証明されている⁵⁾。言い換えれば、近年開発・発売された人工呼吸器ではいかなる低圧環境でも気圧を意識せずに盲目的な使用が可能であるが、従来機種では低圧環境下において常に過大な一回換気量の提供に対する気道内圧の監視や、血液ガスや呼気終末二酸化炭素濃度(fraction of end-tidal carbon dioxide: F_{ETCO_2})などによる分時換気量増大の評価が必要となる。例えばLTV1000/1200では高度計は搭載しておりBTPS機能(次項参照)を有しているものの、その補正ロジックが簡易であるため^{注2)}、低圧環境下での一回換気量が不正確となる傾向にある。

なお、概ねほとんどの機種で FiO_2 、PEEP、強制換気における呼吸回数設定値とほぼ同値であり臨床的に問題とならない誤差範囲であるとされる⁵⁾。

VII. BTPS 機能について

BTPSとは、BT(body temperature: 体温)、P(ambient pressure: 周辺気圧)、S(saturated with water vapor: 飽和水蒸気状態⇒湿度100%)を表す用語であ

注2) パシフィックメディコの回答による。

る。低圧環境や高高度飛行中の機内環境と体内環境(気道内や肺内)とはこれらの3つ要素が大きく異なるため、ボイル・シャルルの法則に基づいて、前述した高度補正の他に、湿度と温度においても一回換気量の補正を行う必要がある。

近年では、気道内を体温37℃、気道内湿度100%とし、周辺大気気圧・気温・湿度の測定値との乖離に基づき換気量補正を行う機能を有する人工呼吸器が多い。補正のロジックは呼吸器によって異なる。例えば、本邦で頻用される高性能の搬送用人工呼吸器のうち、Monnal T-60やOxylog3000はBTPSの全項目を測定し補正しているが、T1は搭載した高度計に基づく気圧のみ補正を行い、体温と湿度については口元のフローセンサーにおける吸気と呼気のフローの計測値の乖離から二次的に吸気フローに対してフィードバックを行いBTPSに近似した補正を行っている^{注3)}。

航空機内はエンジンより加温した空気を取り入れて機内の温度調節を行っているため、極めて乾燥しており(湿度10~20%)、また患者搬出入時の機内の温度変化も大きく、高度補正のみならず温度・湿度の補正も重要である。

VIII. 気圧変化に対する動的応答

人工呼吸器の機種にもよるが、低圧環境のベンチマークテストの結果から、一般には高度上昇時(負の圧変化率(= dp/dt))には換気量は増大し、降下時(正の dp/dt)には換気量が減少する傾向にある^{1,3)}。一方、与圧装置を有する航空機では基本的には上昇・降下にかかわらず、一回換気量の増減は生じない。

通常の航空医療搬送では航空機の上昇率・降下率は緩やかであるために、こうした事態の懸念もさほど持たなくてもよい。また近年の人工呼吸器の高度補正のサイクルは極めて短時間かつ頻回に高度補正を行う(ちなみにMonnal T-60は5msecごとにBTPSの補正が行われる^{注4)})ため、気圧変化に対する追従性は高い。しかしこうした新しい機種を含め全ての人工呼吸器において、与圧装置のトラブルや航空機の構造が損壊し気密構造が破綻した時は極めて急激に気圧が低下する(=急減圧事象)ため、いかなる気圧の変化率(dp/dt)に対しても正しく換気量が応答できるかの評価が必要である。

注3) 日本光電工業の回答による。

注4) IMIの回答による。

IX. turbine drive か？ pneumatic drive か？

turbine drive の人工呼吸器では、高度上昇に伴い空気が希薄になるためタービンによる供給圧の限界が生じる。一方 pneumatic drive の製品では供給圧はポンペ内圧に依存するため高度による供給圧の低下を生じない。それゆえ過去のベンチマークテストで低圧環境下では pneumatic drive の優位性を述べている文献も存在した。

しかし近年はタービンの性能が向上したため（機種によって異なるが、概ね 200LPM 以上）、最近のベンチマークテストなどでは、新しい turbine drive の人工呼吸器は pneumatic drive の製品と比較して遜色がないばかりか、BTPS の補正ロジックの正確性も併せて従来型の pneumatic drive の製品よりも優れていると述べている文献もある。また pneumatic drive の人工呼吸器にも、低圧環境において過大な一回換気量を提供する機種があるとも報告されている^{1,3,5)}。

図 2 は T1 における高度と最大供給圧の関係を示したものである（日本光電工業の提供による）。T1 のタービンの性能は 1 気圧下で最大 260LPM と極めて高く、高度 3,000m から最大供給圧は減衰するものの、いかなる高度帯においても肺保護戦略に基づいた換気 ($P_{plat} < 30\text{cmH}_2\text{O}$) を提供している範囲では、臨床使用上は一切支障ないと言える。

さらに考慮しなければならないのは、民間航空機においては IATA（国際航空運送協会）の危険物取扱書により機内に持ち込める医療用酸素ボンベの制限（液体酸素は不可、1 本あたりの重量は 5kg まで）が規定されており、その取扱書に基づき、航空会社ごとに持ち込み制限を定めている¹¹⁾。pneumatic drive の人工呼吸器は、ボンベの供給圧が低下すると動作しなくなることを考慮しておく必要がある（注：警察・消防・海上保安庁・自衛隊の航空機は医療用酸素ボンベの持ち込みについて、独自に、あるいは航空機ごとに制限や基準・規則を定めている）。

X. 量規定換気か？それとも圧規定換気か？

現時点でそのいずれが適切かを有意に論じた文献はない。ただし、前述したように、低圧環境での人工呼吸管理において、従来型の量規定換気の一換気量は機種によっては大きく設定値と乖離し、傾向としては

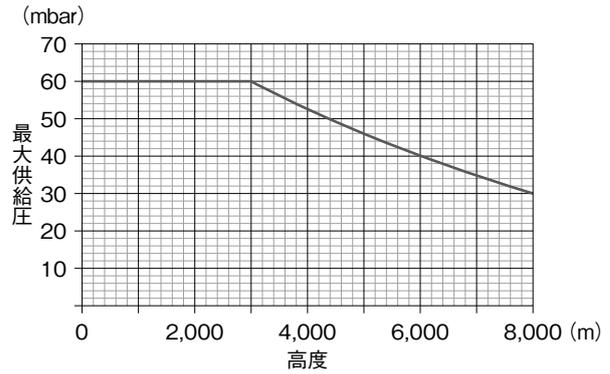


図 2 T1 における高度と最大供給圧の関係

高度が上昇し大気圧が低下し空気が希薄になると、turbine-drive の性能上、回転数を上げてても供給圧の限界が生じる。この、高度と最大供給圧の関係は機種に特異的なものであるが、例えば T1 では高度 3,000m までであれば、T1 の性能限界である 60mbar ($=60\text{cmH}_2\text{O}$) まで過不足なく供給できることになる。また肺保護戦略 ($P_{plat} < 30\text{cmH}_2\text{O}$) の範囲であれば、全高度帯において支障なく使用できることになる。

（日本光電工業提供）

旧機種に属するものほど設定値よりも過大な一回換気量を提供する。一方、圧規定換気ではいかなる高度においても設定吸気圧は遵守されることから、一回換気量は大きく変化しにくいかもしれない。

低コンプライアンスの肺においては過大な一回換気量により容易に圧損傷（容量損傷）を生じ気胸に進展すると、低圧環境ではシャルルの法則から軽微な気胸が緊張性気胸へ進展する可能性があり、安全性の観点からも圧規定換気は量規定換気に比べ安全な換気であると言える。

ただし、前項でも述べたように、turbine drive の人工呼吸器において、極めて高高度（例えば 3,000m 以上）における吸気圧設定が高圧（High PEEP, APRV など）の換気では、タービンの性能如何によっては定めた吸気時間での圧供給が困難となり、一回換気量が減少する可能性があることに留意する必要がある。

XI. 電磁干渉について

航空機の電子機器から医用電気機器へ、あるいは医用電気機器から航空機の電子機器へ、それぞれの発する電磁波が相互に影響を及ぼす可能性がある。これを電磁干渉といい、それに対する基準として電磁適合性基準が定められている。電磁適合性基準には医療施設における基準としての国際電気標準会議規格（IEC60601-1-2、和訳したものとして JIS T 0601-2）があり、民間航空機搭載に関する基準として米国航空無線通信委員

会基準 160 (RTCA-DO-160) があり、軍用機の搭載基準として米軍規格 461 (MIL-STD-461) がある。これらの電磁適合性基準の厳格性として、MIL-STD-461 が最も厳しく、IEC60601-2 が最も緩い。

これらの基準との適合性の有無から、医用電気機器を、離着陸時を除き使用できるものから常時使用できるものまで、航空会社ごとに個別に定めている。また警察・消防・海上保安庁・自衛隊ごとに対応が異なるが、現状では実機における搭載検証の後に使用が可能になる状況が多い中、今後の方向性として一定の航空機搭載に関する電磁適合性基準 (RTCA-DO-160 もしくは MIL-STD-461、望ましくは後者) を有していれば、実証試験なしに搭載可能とする傾向にあると思われる。

また航空機内では電源供給の不安定さや供給限界、周波数変換装置の必要性 (自衛隊機は商業用電源を搭載していない航空機が多い) からバッテリー駆動が推奨されている (ただし、近年のリチウムイオン電池の発火事故の経緯から、航空会社は機内での医療機器の使用に関しバッテリーの種類に至るまで詳細な届け出を必要としている)。

なお、本邦での薬事承認の都合上、IEC60601-1-2 のみの届出としている人工呼吸器が多いが、欧米では RTCA-DO-160 もしくは MIL-STD-461 まで取得しているものも散見される (例えば T1 は本邦では IEC60601-1-2 のみでの薬事承認であるが、MIL-STD-461 をも取得しており、米軍では航空機搭載可能医療機器として認可リストに掲載している)。自らが用いる人工呼吸器について販売会社などにさらなる電磁適合性基準の詳細を尋ねることを推奨する。

XII. 気管チューブのカフの取扱いについて

ボイルの法則で解説したように、気管チューブのカフは閉鎖腔であるため、低圧環境下ではカフのボリュームが増加するためカフが接している気管粘膜の血流が阻害され虚血性壊死に至る可能性が指摘されてきた。これに対し、過去にはカフに生理食塩水を注入するように教えることもあった¹²⁾。しかし、近年ではカフの素材も low-volume high-pressure カフから、より高コンプライアンスの high-volume low-compliance カフへと変わったことに加え、生理食塩水でカフを充填させる場合、カフ本来の肺への誤嚥を防ぐシール効果を発揮させるために必要な量の生理食塩水を注入した時点

で、既に気管粘膜の血流阻害閾値を超える¹³⁾ことや、カフ圧計による液体が充填されたカフの圧計測が不可能¹⁴⁾などのリスクが報告されるようになった。

本稿の (個人的な) 推薦としては、気管チューブのすべての症例において (生理食塩水ではなく) 空気を注入すべきであり、与圧装置を有する航空機では巡航高度に到達し水平飛行に移行したらカフ圧を評価して必要に応じてカフボリュームを減じ、着陸したら再度カフに不足している空気を追加すれば良い。また与圧装置を持たないヘリコプターなどでは高度が変化すること (例えば 500m ごと) に、カフ圧を評価してカフボリュームの増減を図るべきである。

XIII. 結 語

雑に言えば、新しい搬送用人工呼吸器、しかも ICU-like な高性能機を選択すれば、仮に高高度の低圧環境でも、地上と同じように何ら気にせず使用して、正しく安全で生理的な換気を供給できる。しかし、本学会員はそれでもなお、その背景にある呼吸生理学や人工呼吸器の動作原理などを熟知しようとする方が多いだろうし、大規模災害などでは DMAT 隊の有する人工呼吸器が必ずしも新しい高性能機とは限らない (むしろ経験的には、高度補正機能を持たない、従来型の比較的安価な汎用機であることが多い)。

航空医学はニッチな学問であるが、航空医療搬送は日常の救急でも、そして大規模災害でも不可欠なものとなってきており、であるからこそ低圧環境という異常環境での人工呼吸管理の特性について熟知しておく必要があると考える。

本稿の全ての著者には規定された COI はない。

参考文献

- 1) 酒井秋男, 竹野欽昭, 上條義一郎ほか: ヘリコプター搭載用人工呼吸器の高度補正機能の検討. 医科器械学. 2002; 72: 56-64.
- 2) Dorlac GR, Fang R, Pruitt VM, et al: Air transport of patients with severe lung injury: development and utilization of the Acute Lung Rescue Team. J Trauma. 2009; 66 (4 Suppl): S164-71.
- 3) Blakeman T, Britton T, Rodriguez D Jr, et al: Performance of portable ventilators at altitude. J Trauma Acute Care Surg. 2014; 77: S151-5.
- 4) L'Her E, Roy A, Marjanovic N: Bench-test comparison of 26 emergency and transport ventilators. Crit Care. 2014;

- 18 : 506.
- 5) Boussem S, Coulangue M, Fournier M, et al : Evaluation of transport ventilators at mild simulated altitude : a bench study in a hypobaric chamber. *Respir Care*. 2014 ; 59 : 1233-41.
 - 6) Rodriguez D Jr, Branson RD, Dorlac W, et al : Effects of simulated altitude on ventilator performance. *J Trauma*. 2009 ; 66(4 Suppl) : S172-7.
 - 7) Flynn JG, Singh B : The performance of Draeger Oxylog ventilators at simulated altitude. *Anaeth Intensive Care*. 2008 ; 36 : 549-52.
 - 8) Forsans E, Franck L, Leclerc T, et al : Performance of ventilator at simulated altitude. *Critical Care*. 2012 ; 16(Suppl 1) : 476.
 - 9) 蔵本浩一郎, 吉村一克 : 低圧環境における人工呼吸器の作動試験について. *宇宙航空環境医学*. 2012 ; 49 : 83.
 - 10) Hamilton Medical Inc : Pneumatic performance. A comparison of turbine-driven mechanical ventilators and conventional ventilators.
(White Paper)
<https://www.hamilton-medical.com/dam/jcr:0d4a7c9d-e5e1-4d23-a580-c1bda737a17a/pneumatic-performance-turbine-driven-ventilators-white-paper-en-2014-04.pdf>
 - 11) <https://www.ana.co.jp/share/assist/pdf/oxygen01-2.pdf>
(2015年9月15日閲覧)
 - 12) British Thoracic Society Standards of Care Committee : Manageing passengers with respiratory disease planning air travel : British Thoracic Society recommendations. *Thorax*. 2002 ; 57 : 289-304.
 - 13) Britton T, Blakeman TC, Eggert J, et al : Managing endotracheal tube cuff pressure at altitude : a comparison of four methods. *J Trauma Acute Care Surg*. 2014 ; 77(3 Suppl 2) : S240-4.
 - 14) 蔵本浩一郎, 吉村一克 : 低圧環境下における気管チューブのカフ圧の変動について. *宇宙航空環境医学*. 2011 ; 48 : 35-40.