

【資料】

高気圧酸素治療装置の加圧に伴う酸素供給流量とマスク内酸素濃度の低下について

森 幸夫

HBOテクノ・アドバイザー

キーワード

リザーバ付酸素マスク, 体積流量, 一定圧力供給, 一定差圧供給

keywords

oxygen mask with reservoir, volume flow rate, supply with constant pressure, supply with constant differential pressure

【Information】

Reduction of oxygen flow rate provided and oxygen concentration in a mask with the pressurized hyperbaric chamber

Yukio Mori, HBO Techno Adviser

I. 目的

日本呼吸器学会の酸素療法ガイドラインでは、リザーバ付酸素マスクへの酸素流量と吸入酸素濃度の目安を10ℓ/minで90%以上としている¹⁾。また、萬らは非再呼吸式リザーバ酸素マスク(oxygen mask with reservoir, 以下RM)の装着具合と酸素供給流量が吸入酸素濃度に及ぼす影響について高機能患者シミュレーターを用いて評価した結果、酸素流量は12ℓ/minできれば15ℓ/minとしたほうがよいとしている²⁾。さらに、大久保らは吸入酸素濃度の実際として、様々なマスク形状における流量と装着状態の影響に関する検討結果として、Normal(口鼻全体をマスクで覆い、ストラップを適切に締めた状態)で口元の酸素濃度を90%以上にするためには、少なくとも20ℓ/minが必要であったと報告している³⁾。

大久保らによるこの論文は、大気圧下で高機能患者シミュレーターを用いた結果であるが、臨床使用では鈴木らの参考文献⁴⁾と筆者らの参考文献⁵⁾を引用し「高気圧下においては、一定圧力で供給された酸素流量は、環境圧力の平方根に逆比例するため、酸素流量が低下することに考慮を要する」旨が記述されている。この引用のうち、酸素供給条件すなわち「一定圧

力で供給」部分の記述が間違いであり、鈴木らが行った「一定差圧供給」に修正すべきである。また、筆者らの報告⁵⁾は、鈴木らの「一定差圧供給」での結果を追認すると共に、一定圧力供給での計測を行い「一定圧力供給では環境気圧(単位はatmosphere absolute以下ATA)の逆数を乗じた値に低下する」ことを明らかにしたもので、大久保らの引用には不適切な記述が含まれる。

本稿は正しい理解を得るために、大久保らにより引用された両論文の関連部分を整理するとともに追加データを含めた検証結果を提示して、今後の研究の一助に供することを目的とする。

なお、本稿で記述する流量は特記部分を除き体積流量を示し、加湿器付属流量計(汎用品)の目盛基準を20℃1ATAとする。

II. 背景

高気圧酸素治療(Hyperbaric oxygen therapy以下HBO)は、高気圧環境下で患者に高濃度酸素を投与し、増量した溶解型酸素と圧力変化により治療効果を得る。この治療の場である高気圧酸素治療装置(以下、装置という)は、加圧媒体により「酸素加圧」と「空

気加圧」に区分される。国内に導入された装置は、患者1名のみを収容する第1種装置が大半を占め、複数の患者ないし患者と医療職員を収容する第2種装置が1割弱である。第1種装置の大半は「酸素加圧」で、第2種装置と一部の第1種装置では「空気加圧」が行われている。「酸素加圧」では、装置内の空気を酸素で置換した環境気（概ね100%酸素）を患者に吸入させ高濃度酸素を投与できる。一方、国内の「空気加圧」装置ではRMを患者に装着し、外部より酸素を供給する方法が一般的にとられている。このRMは、軽量で装着時の違和感が少なく低廉であるが、密着性が低く環境空気の流入によりマスク内の酸素濃度低下が生じる。

RM内の酸素濃度すなわち吸気酸素濃度の低下要因には、マスクの構造・機能、装着状態及び酸素送入手量と患者の呼吸態様等がある。これらのうち、酸素送入手量は治療開始前に設定されるが、その際の酸素濃度を治療圧力で維持するには、装置の加圧により低下する流量を補正する必要がある。また、装置内の酸素濃度は、RMからの排出と溢流酸素で上昇するので、第2種装置では、高気圧酸素治療の安全基準（日本高気圧酸素・潜水医学会）による装置内環境気の酸素濃度を上限値（23%）に抑制するために新鮮空気による換気が行われる。この換気量は、装置内への酸素送入手量（マスク供給量×人数）に見合った量に設定されるが、空気源装置の能力により制約を受ける場合がある。

Ⅲ. 方法と結果

1. 加圧による酸素濃度低下の検討

大西らは、環境気圧の上昇による吸気酸素濃度の低下につき、空気加圧の第1種装置に質量分析計（Perkin Elmer製MGS1100RMS-3）を接続し、1) 非再呼吸式マスクで鼻腔カテーテル（図1）より採取、2) 再呼吸式マスクで鼻腔カテーテルより採取、3) 非再呼吸式マスクの側口より採取により被検者各10名に対し、環境気圧1~2.5ATA、酸素流量10, 20, 30 l/minでCO₂, O₂, N₂濃度等の測定結果を報告した。その測定結果のうち1)の結果は、大気圧下で酸素流量10 l/minとした際の吸気酸素濃度93.1±

4.6%が、2ATAに加圧した際に85.3±8.4%に低下し、20 l/minに増量して2ATAに加圧した際に同等の93.6±5.7%にできたこと（図2）。この結果より、大気圧で10 l/min相当の酸素濃度を2ATAで維持するには、流量を20 l/min、すなわち環境気圧（ATA）に比例して増加させる必要があるとしている⁶⁾。

2. 加圧による酸素流量低下の数式的検討

鈴木らは「高気圧下で酸素流量が低下する」と考えられる理由を、以下の通り数式的に解析している。流

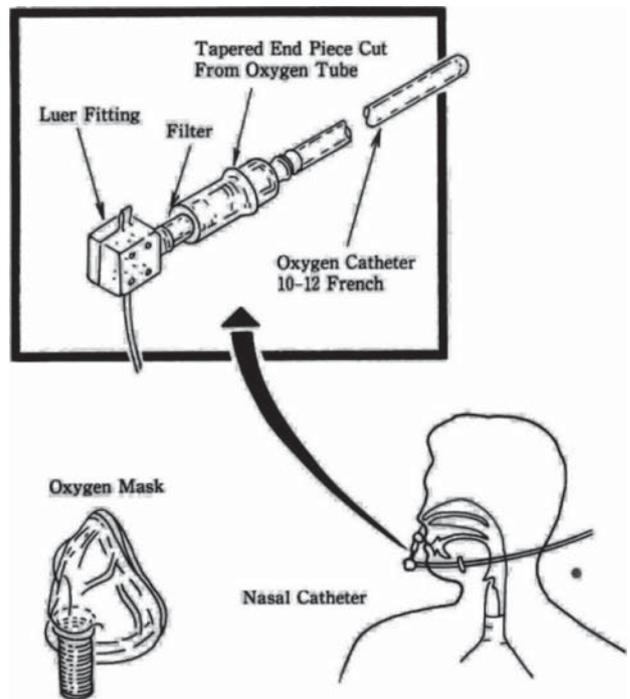


図1 鼻腔カテーテル（参考文献⁶⁾図2を転載）

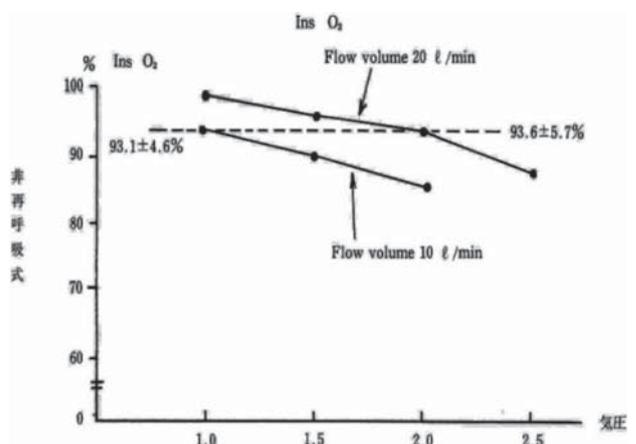


図2 酸素流量の違いによる吸気酸素濃度の差（参考文献⁶⁾の図8を抜粋転載）

量は流速に断面積を乗じ求められるが、加圧により断面積が変化しないので流速を求めればよい。流速は、定常流で音速より充分小さく非圧縮性流体とみなせば Bernoulli の定理により (1) 式が成立する。

$$P + \rho V^2 / 2 = P_0 \dots \dots \dots (1)$$

P: 静圧, P₀: 総圧, ρ: 密度, V: 流速

(1) 式より V は,

$$V = \sqrt{2(P - P_0) / \rho} \dots \dots \dots (2)$$

(2) 式より流速は密度の平方根に逆比例することがわかる。また、密度は温度変化を無視すれば圧力に比例する。したがって、高気圧状態にする程流量は低下し、(3) 式の関係すなわち、流量は治療圧力の平方根に逆比例して低下する。

$$\text{流速} \propto 1 / \sqrt{\text{治療圧力}} \dots \dots \dots (3)$$

また、治療中に「加湿器付属流量計の指示が下がない」理由を、流量計モデルでフロートが流体から受けた抵抗で浮いていると考え、その抵抗は密度と流速の関数となり、加圧による密度の増加と前述の流速低下が打ち消しあうためと解析している。

3. 加圧による酸素流量と濃度低下の実験的検討

鈴木らは、前項の数式的解析結果を踏まえ、**図3**に示す第2種装置の酸素供給システムで酸素流量と吸気酸素濃度の測定を行っている。なお、この酸素供給システムの酸素供給ラインは、液体酸素タンクより2段階減圧されデマンドバルブを通して装置内のアウトレットに供給される。このデマンドバルブは、その2次圧すなわち加湿器付属流量計への供給圧力と装置内圧力の差が常に一定に調整され、装置内圧力の上昇分だけ2次圧も上がる仕組みとなっている。

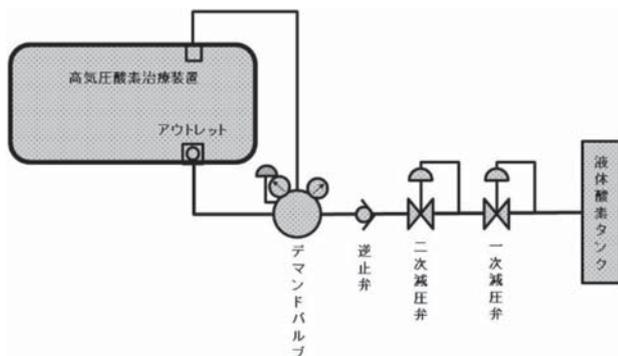


図3 酸素供給システム (参考文献⁴⁾ 図2を転載)

酸素流量の測定方法は、正確に測定した1.5ℓの水をビンに満たし、このビンを逆さにして水を張った水槽に口の部分だけを浸し、このビンの中に管をいれ酸素を流してビンの水が酸素に置き換わる時間を5回繰り返して計り、その平均時間より流量を求めた。また、患者への酸素投与は、治療開始前にインスピロン酸素マスクを装着して加湿器付属流量計で流量を15ℓ/minに設定し、サンプルチューブを鼻孔に0.5~1cm挿入し呼吸ガスを採取して装置外部のオメダ社製4700オキシキャップに導き、吸気酸素濃度と呼気終末炭酸ガス濃度の連続測定を正常人及び突発性難聴患者10名を対象に行った。

酸素流量の測定結果は、大気圧下(1ATA)で15ℓ/min(実測値は15.1ℓ/min)に設定したものが、1.5ATAで理論値12.2ℓ/min(実測値も同値)に、2ATAで理論値10.6ℓ/min(実測値も同値)に低下し、理論値と実測値が一致していた。吸気酸素濃度の測定結果は、1ATAで82±4%だったものが2ATAでは70±7%あり平均約12%の低下を認めた。この結果より気圧と酸素流量とは直線的な関係ではなく、環境気圧(ATA)の平方根に逆比例して流量が低下することを数式的にも実験的にも確かめられたとしている。

4. 酸素供給圧力の制御方式と酸素流量低下の検討

筆者らは、参考文献⁵⁾に示すとおり第1種装置(SECHRIST Model 2500B)内の酸素アウトレットに湿潤器(新鋭102L型, 30ℓ/min)と容積積算型の膜式テストガスメータ(品川DC-5又はDC-1型)接続すると共に、マンメータ3台を接続して実験回路(**図4**)を構成し、環境圧力の上昇に伴う酸素流量の変動を計測した。なお、実験回路中の流量計(大気圧式)付き湿潤器の構成イメージを**図5**に示す。

実験(1)では、回路の「A」部分を直通配管とし、酸素ボンベの圧力調整器で流量調節弁の入口圧力P₁を0.49~0.53MPa(5~5.4kgf/cm²)の範囲内で設定し「一定圧力供給」で行った。実験(2)では、「A」部分に鈴木らのいうデマンドバルブ(定差圧制御弁)を設置し、流量調節弁(**図5**)の入口圧力P₁を装置内圧力+差圧0.044MPa(0.45kgf/cm²)とした「一定差圧供給」で行った。なお、本稿では参考文献における実験

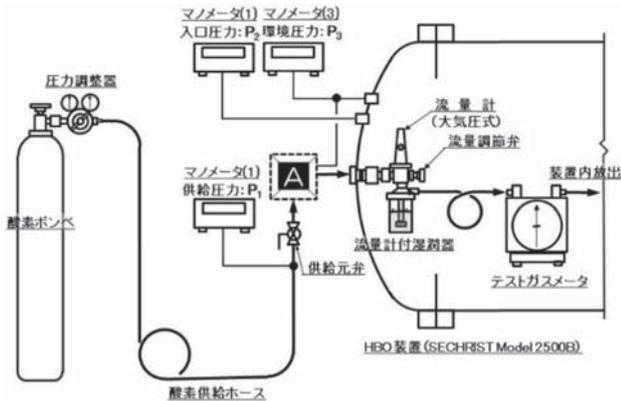


図4 試験回路の構成と系統(参考文献⁵⁾図1を転載)

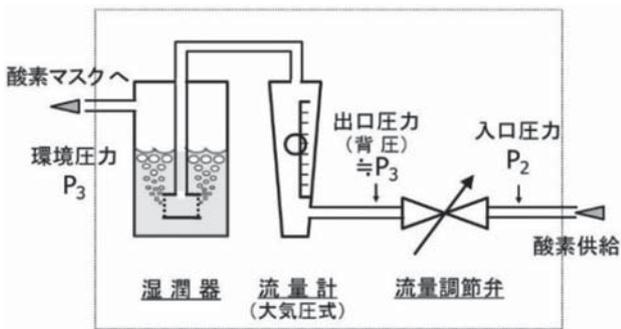


図5 流量計付き湿潤器の構成(参考文献⁵⁾図2を転載)

(3)の記述を省略する。

実験(1)「一定圧力供給」の結果は、環境圧力 P_3 とその圧力における容積流量(本稿では体積流量という)の計測値を図6にマークで示すが、1ATAでの設定流量(以下、初期設定流量という)15 l/minが、2ATAで7.5 l/min、2.8ATAで5.4 l/minに低下した。この結果より「一定圧力供給」では、実線で示す初期設定流量に環境気圧(ATA)の逆数を乗じた計算値に相関して低下することを確認した。実験(2)「一定差圧供給」の結果は、初期設定流量15 l/minが、2ATAで10.2 l/min、2.8ATAで8.7 l/minに低下した(図7)。この結果より「一定差圧供給」では、実線で示す初期設定流量に環境気圧(ATA)の平方根の逆数を乗じた計算値に概ね相関して低下することを確認した。

5. 質量流量計による酸素流量低下の検証

今回、「一定圧力供給」による流量低下の追加した検討として、質量流量計(azbil製CMS0050)と恒

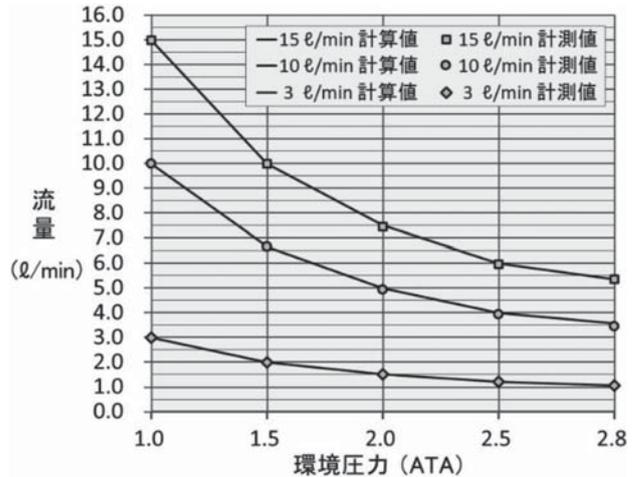


図6 一定圧力酸素供給における流量変化
1ATAで初期設定値に調節した流量は、環境圧力の上昇に伴い、実線で示す計算値に沿って低下した(参考文献⁵⁾図4を転載)

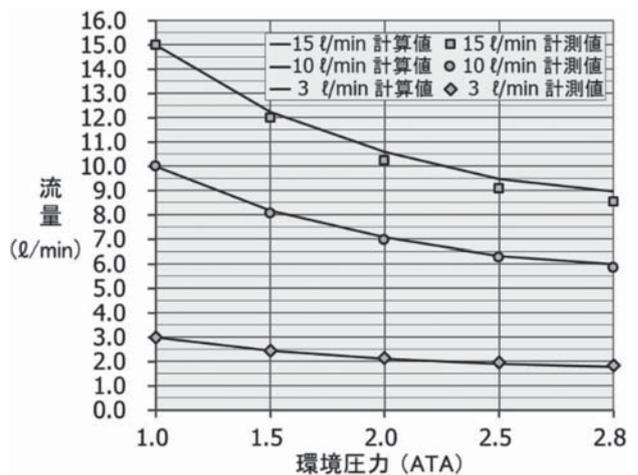


図7 定差圧酸素供給における流量変化(参考文献⁵⁾図5を転載)

圧式流量計付湿潤器(小池製セフティフロー-RM321)を用いた試験結果を報告する。なお、質量流量計が20°C、101.325kPa.abs換算で表示されるため、ボイル=シャルルの法則(combined gas law)を適用し、その読み値を読み取り時の環境気圧(ATA)で除して環境気圧下における体積流量とした。

試験結果は、流量計により初期設定値を10 l/min(質量流量計測値9.9 l/min)としたものが、1.5ATAで10.0 l/min(同9.8 l/min)、2.0ATAで10.0 l/min(同9.8 l/min)であった(表1, 図8)。この結果では、流量計と質量流量計の読み値は、何れも低下を認めな

表1 質量流量計による酸素流量低下の検証
(一定圧力供給・恒圧式流量計)

区 分	環境圧力(ATA) / 読み値(ℓ/min)				
	1.0 (大気圧)	1.5	2.0	1.5	1.0 (大気圧)
・湿潤器流量計-A	・10.0 (設定)	10.0	10.0	10.0	10.0
基準器(質量流量計)	9.9	9.8	9.8	9.9	9.9
・湿潤器流量計-B	・10.0 (設定)	10.0	10.0	10.0	10.0
基準器(質量流量計)	10.1	10.0	10.0	10.1	10.1
・湿潤器流量計-C	・10.0 (設定)	10.0	10.0	10.0	10.0
基準器(質量流量計)	10.0	9.9	9.9	10.0	10.0
基準器読み(平均値)	10.0	9.9	9.9	10.0	10.0

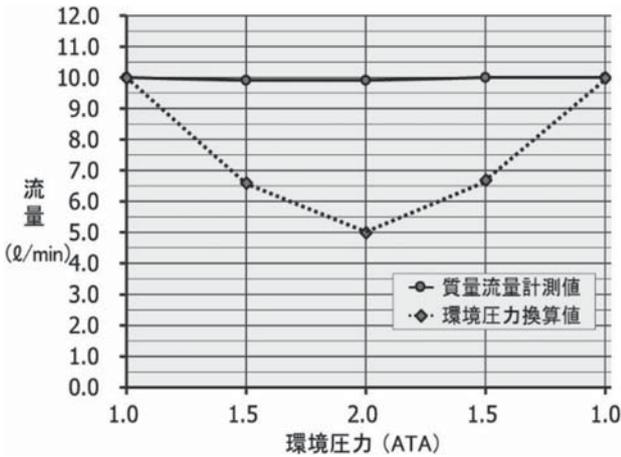


図8 一定圧力酸素供給における流量変化
質量流量計で計測し、環境圧力下における体積流量に換算

かった。しかし、環境気圧下における体積流量への換算値は、1.5ATAで6.5 ℓ/min, 2ATAで4.9 ℓ/minに低下し、前述の4.実験(1)の結果(一定圧力供給では環境気圧(ATA)に逆比例して低下する)が検証できた。

IV. 考察

空気加圧装置における呼吸用酸素の供給は「一定圧力供給」が一般的であるが、一部の装置では「一定差圧供給」が採用されている。これらの供給方式による環境気圧をx, 供給圧力をy, 供給圧力の初期設定値をαとすれば、その関係式は次のとおりとなる(図9)。

- ・一定圧力供給では $y = \alpha$ (一定)
- ・一定差圧供給では $y = \alpha + x$

前述Ⅲ-1.の大西らによる検討では、治療開始時の

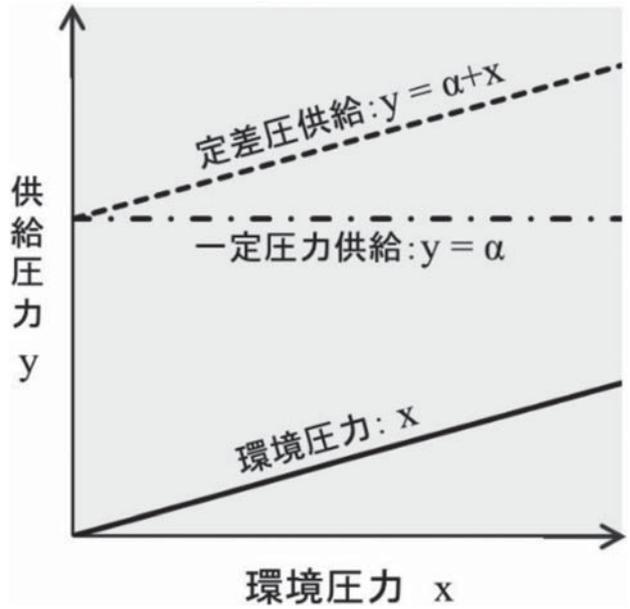


図9 マスクへの酸素供給方式の比較
一定圧力供給が一般であるが、一部の装置では定差圧供給としている

酸素濃度を治療圧力で維持するためには「環境気圧(ATA)に比例して酸素流量を増加する必要がある」と結論されている。この文献には酸素供給圧力の記述がなく、おそらく「一定圧力供給」であったと思われ、「装置の加圧により酸素流量が環境気圧(ATA)に逆比例して低下する」と言いかえできるが、その検証までは行われてない。しかし、36年前の問題意識としては刮目すべき点であるが、一般には装置の加圧低下分を見込んで初期流量設定を行っているのが現状である。

前述Ⅲ-2.の鈴木らによる疑問点の解明は、日常経験する現象に対し論理的な解析が行なわれているが、その基本となるBernoulli 定理の適用で「非圧縮性流体とみなす」ことに疑問が残る。また、酸素流量の設定は湿潤器付属流量計で行われるが、その流量調節弁の縮流部では、鈴木らが前提とした「亜音速領域」ではなく、音速領域でチョークドフロー状態であったものと思われる⁵⁾。

前述Ⅲ-3.の鈴木らの検討は、デマンドバルブ(図10)を用いた「一定差圧供給」であり、RMへの供給酸素流量が「環境気圧(ATA)の平方根に逆比例して低下する」と結論されている。しかるに、大久保らは、その前提条件が一定圧力で供給した場合、す

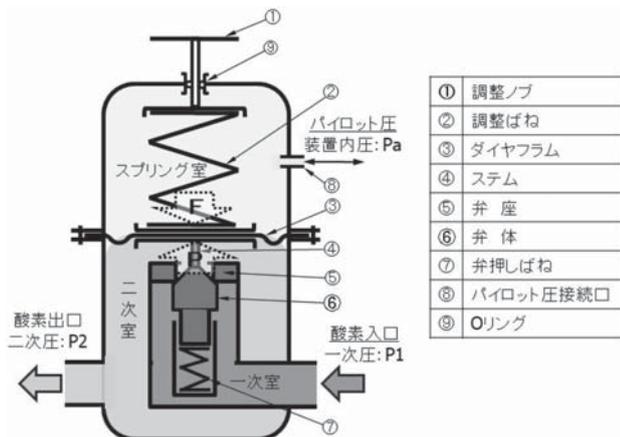


図10 汎用圧力調整器とデマンドバルブ（イメージ）

1. 汎用圧力調整器（パイロット圧接続口は大気開放、調整ノブのOリングなし）
 - ・ダイヤフラムを境に、設定ノブと調整ばねで押下げる力をF、二次圧により押し上げる力をPとすれば、
 - ① $F > P$ でダイヤフラムが弁体を押し下げ、弁座が開き一次室より二次室へ流れ二次圧が上昇する。
 - ② $F < P$ でダイヤフラムが押し上げられ、同時に弁押しばねが弁体を押し上げ弁座を閉じる。
 - ・以上の繰り返しで二次圧が設定値P2に調整される。
2. デマンドバルブ（定差圧制御弁）
 - ・パイロット圧がダイヤフラムに作用し、設定ノブの設定圧P2+パイロット圧（装置内圧）Paに調整される。

なわち「一定圧力供給」としており、この結果と整合しない。また、同文献における【参考文献】¹⁰⁾のタイトル名に誤植（低流量→定流量）がある。

筆者らによる追加検討では、呼吸用酸素を「一定圧力供給」と「一定差圧供給」で実施した。「一定圧力供給」では加圧により初期設定流量に環境気圧（ATA）の逆数を乗じた値同様に低下することを確認し、前述した大西らによる結論の言いかえと整合する。また「一定差圧供給」では、初期設定流量に環境気圧（ATA）の逆数を乗じた計算値に概ね相関して低下することを確認し、鈴木らの結論を追認した。

これらの結果より、治療開始時の吸気酸素濃度を治療圧で維持するには、RMへの酸素供給量を加圧時に増量し、減圧時に減量を要することを確認した。この増量を実現する手法は鈴木らによる参考文献⁴⁾で報告されているが、その自動化すなわち加圧時の増量

操作と減圧時の減量操作の自動化については、筆者らによる参考文献⁵⁾で報告し既に実用化している。また、第2種装置内の酸素濃度を安全基準上限値（23%）に抑制するための換気量は、筆者らが送入酸素量の50倍と概算して報告した⁶⁾。しかし、第1種装置ではこの換気量が非現実的であり、RMを用いた装置内の酸素濃度を23%以下に抑制することは困難である。

V. まとめ

空気加圧装置では、一般にRM（リザーバ付酸素マスク）を用いた酸素投与が行われているが、装置の加圧に伴う酸素流量の低下とその対応につき以下のことを確認した。

- 1) 一定圧力供給では酸素流量が環境気圧（ATA）に逆比例して低下し、一定差圧供給では環境気圧（ATA）の平方根に逆比例して低下する。
 - 2) 治療開始時のRM内酸素濃度を治療圧で維持するには、加圧時に酸素流量の補正を要する。
- これらの結果より、大久保らの参考文献³⁾での引用条件と内容の不整合と確認すると共に、その参考文献リストの誤植を指摘した。

参考文献

- 1) 日本呼吸器学会肺生理専門委員会, 日本呼吸管理学会 酸素療法ガイドライン作成委員会: 酸素療法ガイドライン. 東京; メディカルビュー社. 2006; pp40-41
- 2) 萬知子, 森山潔, 本保晃, 他: 非再呼吸式リザーバマスクの装着具合と供給酸素流量が吸入酸素濃度に及ぼす影響—高機能患者シミュレータを用いた研究—. 日本集中治療医学会雑誌 2014; 21:607-613
- 3) 大久保淳, 小柳津卓哉, 宮本聡子, 他: リザーバ付き酸素マスクにおける吸入酸素濃度の実際—様々なマスク形状における流量と装着状態の影響—. 日本高気圧・環境医学会雑誌 2017; 52:111-116
- 4) 鈴木英一, 日沼吉孝, 波出石弘, 他: 高気圧酸素治療中における酸素流量および吸気酸素濃度の低下について. 日本高気圧環境医学会雑誌 1991; 26:201-206
- 5) 森幸夫, 江東孝夫, 戸崎剛: 高気圧酸素治療における酸素投与に備えた定流量制御弁開発の試み. 日本高気圧環境医学会雑誌 1999; 33:91-98
- 6) 太西春樹, 田村章, 杉生隆直, 他: 高気圧治療中の生体モニタリング—高気圧治療中の呼吸ガスのマススペクトロメーターによる連続監視について—. 日本高気圧環境医学会

雑誌 1981;16:89-96

7) 森幸夫,中島正勝:HBO装置内環境気の二酸化炭素分
圧及び酸素濃度について — 現行「高気圧酸素治療の

安全基準」の検証と考察一.日本高気圧環境医学会雑誌
2001;36:209-214