

●特集・安全な高気圧酸素治療のために

高圧環境での機器・器具の使用

—第二種装置—

勝本淑寛* 布施安弘* 中村達雄**
伊東範行*** 野口照義****

キーワード：HBO，指標，生命維持管理装置，異空間，臨床工学技士

はじめに

通常，病院内で使用されている医療機器・器具は，高気圧酸素治療室（以下 HBO と略）のような環境下で使用されることを考慮して製造されている機器類は稀である。

また，製造業者・販売業者が HBO とはどのような治療法なのか？を理解しているとは言い難い。それゆえ，これらの医療機器・器具を HBO 下で使用する際の，物理的影響や使用上の注意点，対策について問い合わせても明確な回答を得られることは皆無に等しい。

以上を背景として，表 1 に示した第二種 HBO 下でも使用される主な医療機器・器具と当センターで自作して使用している機器・器具の現状と指標・注意点について報告したい。

呼吸管理用機器・器具

HBO 下で呼吸管理用機器・器具の使用に当たって特に注意する主な点は，圧の変動による気体の容量の変化，密度の変動による気流量の変化と吸入ガスの極端な低湿度である。

1. 酸素流量計

酸素流量計は，図 1 に示したように流量調節バルブがテーバー管の前図 1-a に付いているタイプ（本文では大気圧型と呼ぶ）と後ろ図 1-b に付

いているタイプ（本文では恒圧型と呼ぶ）がある。酸素はいずれのタイプも流量調節バルブのオリフィス以降で大気下に放出され，大気圧下で流量調節したオリフィスの開度のままであれば鈴木ら¹⁾が報告した通り，HBO 内の気圧の上昇と共に密度（絶対治療圧力）の平方根に逆比例して低下する。

しかし，いずれのタイプも真の流量は同量に低下しているにも拘らず，テーバー管の指示流量は回路中に置かれている位置で浮子の示す見掛け流量は，全く異なる。

流管の断面積 A を流れる定常流の流量は，

$$\text{体積流量：} Q = Au \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

$$\text{質量流量：} \dot{m} = \rho Q = \rho Au \quad [\text{kg}/\text{s}] \quad \text{—————(1)}$$

u ：平均流速， ρ ：密度

で表される。連続の式から質量流量は調節バルブのオリフィスの一次側，二次側に関係なく至る所で一定であるが，体積流量は背圧の影響を受けるオリフィスの二次側のみが密度の影響を受け，(1)式より $Q = \dot{m}/\rho$ となる。

このため，オリフィスの一次側の圧が一定であれば，図 1-a の浮子は密度（絶対治療圧力）の平方根に逆比例して低下し，背圧の影響を受けない図 1-b の浮子は変化しない。

また，基本圧に治療圧を加算する定差圧スライド減圧弁を介して一次側に圧が供給されている場合には，図 1-b の浮子は [スライド後の圧/基本圧] の平方根に比例した密度の増加分だけ浮子は，逆に上昇する。

以上のように，一度 HBO 下に置かれた浮子は

*千葉県救急医療センター集中治療科

**千葉県救急医療センター麻酔科部長

***千葉県救急医療センター診療部長

****千葉県救急医療センターセンター長

表1 HBO下でも使用される機器・器具

【呼吸管理用機器・器具】	
酸素流量計	(恒圧型, 大気型)
酸素投与具	(マスク型, テント・フード型, 一方弁T字管 気管内挿管チューブ)
人工呼吸器	(ポリウム型, プレッシャー型)
吸引器	(壁掛吸引器, 低圧持続吸引器)
加湿器	(ハンドメイド)
カフ圧調節器	(低差圧調節型, ハンドメイド)
PEEP ボトル	(ハンドメイド)
【循環管理用機器・器具】	
点滴器具	(ガラス, プラスチック, シート, 定量)
輸液ポンプ	(流量制御型, 滴数制御型, シリンジポンプ インフューザー)
ペースメーカー	(埋め込み型, 体外型)
【生体モニター用機器・器具】	
心電計	(ホルター)
脳波計	(トレンド, 誘発電位)
経皮酸素分圧計	
体温計	(深部仕温計)
血圧計	(観血型, 非観血型「水銀, 超音波, リバロッチ型自動血圧計」)
【その他機器・器具】	
チェストドレーン	
脳層・脳室ドレナージ	

真の流量の指標とはならず、また、同じような流量計であっても見ている指標の位置によって全く違う事象となる事に注意しなければならない。

尚、HBO 治療における流量を制御する方法として、森ら²⁾は圧力自動補正機能を備えた定流量制御弁を開発し、流量の低下を補正できたと報告している。我々も現在、流量と指標が一致する流量計を考案中である。

2. 人工呼吸器

HBO を意識してワンマン用に開発された人工呼吸器以外、一般的に普及している人工呼吸器を HBO に用いた場合にも酸素流量計と同じ理由でプレッシャータイプ、ポリウムタイプに限らず、オリフィスの形状によって差はあれ、換気流量は低下する。

元来、人工呼吸器の管理を必要とするような HBO 患者に対しては、呼吸管理に精通した医師

や臨床工学技士・看護婦(士)などが一緒にチャンパー内に入室し、患者の呼吸管理に当たるのが当然である。

当センターでは、加減圧の変圧に伴う器械的な流量の増減を患者の呼吸に見合った最適な換気量になるよう最大気道内圧と患者の胸郭の動きを指標として、吸気流量のオリフィスを調節している。万一、目的の治療圧力に達する前に人工呼吸器の吸気流量調節が MAX となってしまった場合には、たとえ 2ATA 以下であってもその時点の治療圧力としている。

尚、吸気回路側にリリース弁が付いている人工呼吸器は、大気圧下で適切な設定に調節されたものであっても、HBO 下では気圧密度の増加に伴ってリリース弁が作動し、低換気となる可能性があるので注意を要する。我々が最大気道内圧を指標として提唱する理由の一つである。

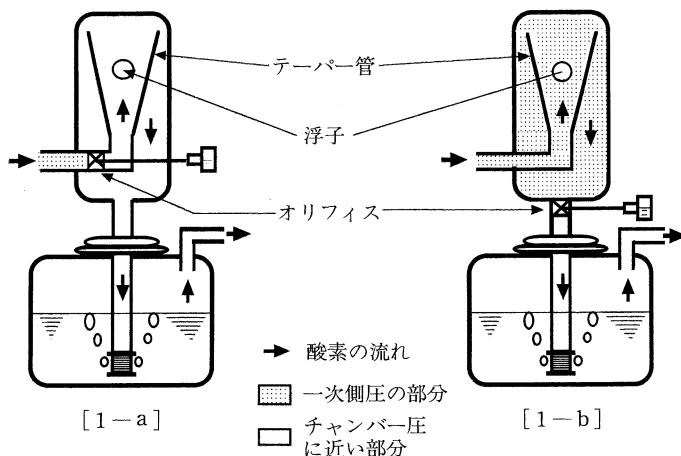


図1 酸素流量計

3. 加温加湿器

現在、市販されているセラミックヒーター内蔵の湿潤器付き酸素流量計や人工呼吸器用のカスケード型加温加湿器は、HBO 下での使用に対してどのような危険があるのか想定が難しく、メーカー承認を得られた機種はない。

一般の湿潤器付き酸素流量計の湿潤器内の水の温度は流れる酸素の温度に依存され、当センターの場合には15Lの酸素流量にて8℃まで湿潤器内の水の温度が低下した。8℃における湿潤器内の乾き飽和蒸気密度(絶対湿度)は8.26mg/Lである。この呼吸ガスを吸入した場合の相対湿度は、体温37℃における乾き飽和蒸気密度は43.85mg/Lであるから約19%と極端に低い湿度となる。我々は開院当初、気管内挿管されたHBO患者の呼吸器の状態悪化による治療継続の断念を経験し、この吸入ガスの極端な低湿度を問題点の一つとして捉え、自作の加湿器を作成してきた³⁾⁴⁾。

現在、当センターで自作して使用している加温加湿器を図2に示す。チャンバー内に設置した加温加湿器は、自発呼吸・人工呼吸兼用でチャンパー外よりMAX60℃まで任意に加温できる湯沸かし器の温水を熱源としてローラーポンプにて加湿器内のコイル内部に循環させ、加湿器内の蒸留水を加温して加湿する温水循環式加温加湿器である。熱源となる温水を送る回路は、チャンパー内のチューブ回路に十分な耐圧管を用いれば、チャンパー内の圧力の影響は絶縁でき、ローラーポン

プのチューブはタイゴンチューブ程度でも充分となる。

吸入気の加湿は患者の吸気直前の温度を指標に、吸入ガスの温度が $32 \pm 1^\circ\text{C}$ (37℃に対する吸入ガスの相対湿度が77~86%)となるように外部湯沸かし器の温度を調節する。

4. 酸素マスク・一方弁付きTチューブ

基本的には多くの施設同様、呼吸抵抗の少ないディスポのマスクを使用している。

しかし、気管内挿管された重度の低酸素性疾患の患者や、顔面に熱傷を負った患者には使用できない。気管内挿管チューブは、HBO密度の上昇と共に抵抗は増加⁵⁾し、一回換気量・呼吸数共に増加が見られる重度の低酸素性疾患の患者においては、この抵抗の増加だけでも相当な負担となる。通常、高濃度の酸素を吸入させる場合には、一方弁付きT字管を挿管チューブに接続して使用するが、市販の製品には様々な問題があり⁶⁾、小型軽量の一方弁付きT字管図3を自作した。特徴は、加湿器や呼気中の水分が弁と筒周囲を毛管現象によって張り付けて思わぬ抵抗となるのを押え、気圧密度の増加に対しても抵抗が無く、弁の動きを外部からも観察が可能な点である。

顔面熱傷などのマスクを装着できない患者用として、ヘッドボックスと名付けた首まで入るアクリル製のフード図4を自作使用している。この際、ヘッドボックス内への酸素流量の不足は炭酸ガスの蓄積を招く。

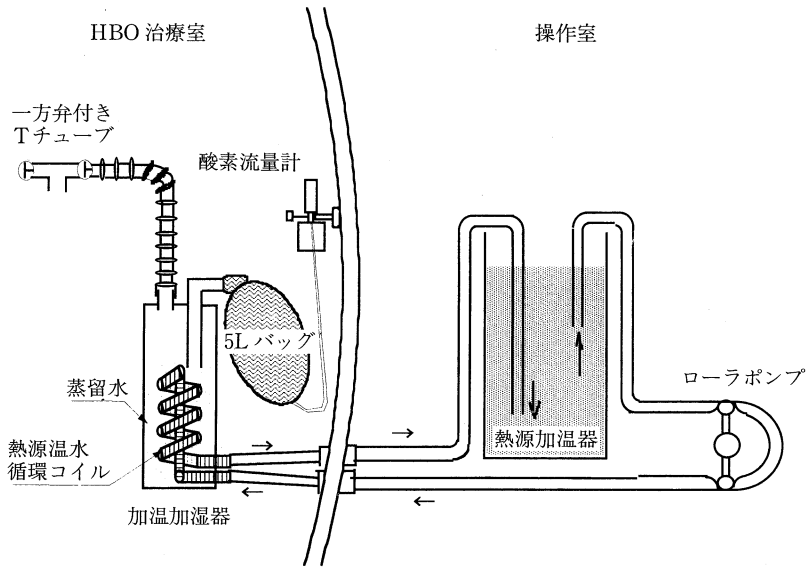


図2 加温加湿装置

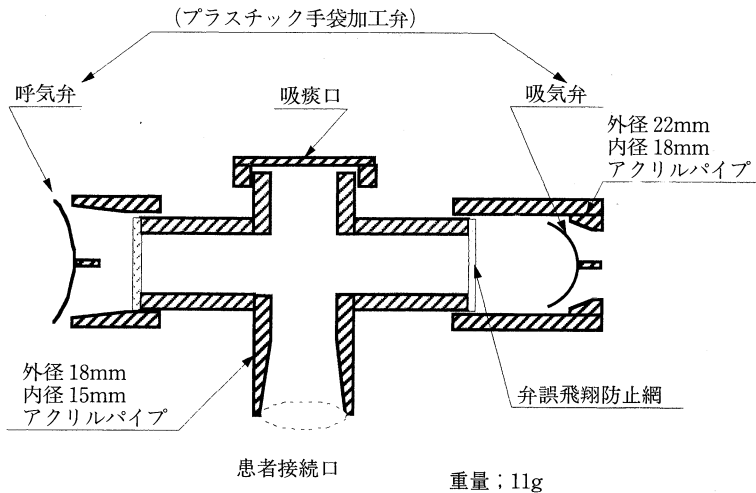


図3 一方弁付きT字管

作業程度別 CO₂吐き出し量と各基準で定められた CO₂の許容度を表2, 3に示した⁶⁾。

通常, CO₂吐き出し量より求める必要換気量は, 次式によって求められる⁶⁾。

$$Q = 100M / (K - K_0)$$

Q : 必要換気量 (L/min/人)

M : CO₂吐き出し量 (L/min/人)

K : CO₂の許容度 (%)

K₀ : 吸気ガス中の CO₂の濃度 (%)

熱傷患者のMを極軽作業程度と仮定し, 酸素中の K₀は0, KはHBO安全基準により0.01キログラム毎平方センチメートル (9.8 ÷ 10.1 × 10⁴ × 10⁻³ pa = 0.97%) を超えない事と規定しているから, 最小必要酸素流量は 100 × 0.37 / 0.97 = 38 (L/min) となる。また, この時の換気回数は自作したヘッドボックス内の容量は29Lであり, 人の首から頭

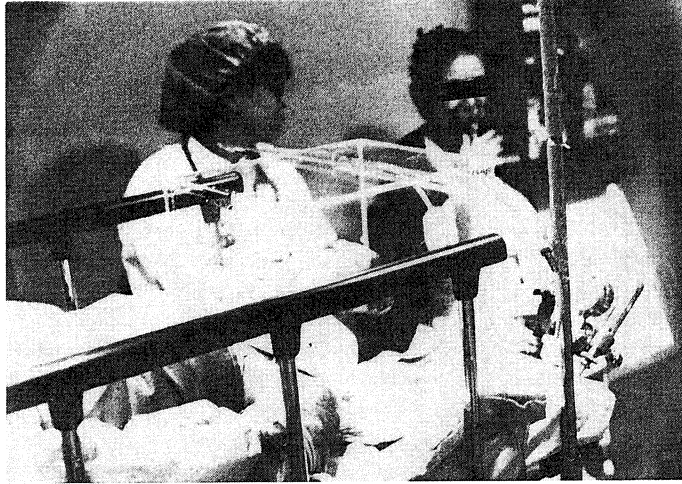


図4 熱傷のHBO治療風景

表2 作業程度別CO₂吐き出し量と酸素による必要換気

作業程度	エネルギー 代謝率 (RMR)	CO ₂ 吐き出し量 (L/min/人)	酸素による必要換気量 (L/min/人)	
			CO ₂ 許容濃度 0.97%	CO ₂ 許容濃度 0.15%
安静時	0	0.217	22.37	144.67
極軽作業	0.8	0.367	37.84	252.27
軽作業	1.5	0.500	51.55	343.67
中等作業	3.0	0.767	79.07	527.13
重作業	5.5	1.233	127.11	847.40

(設備と管理 1981年9月より引用改変)

表3 CO₂の許容度⁵⁾

濃度 [vol %]	意義
0.03	地上付近の大気の標準濃度
0.07	多数継続在室する場合の許容濃度
0.10	一般の場合の許容濃度 (ビル管理法・建築基準法の基準値)
0.15	換気計算に使用される許容濃度 (衛生措置基準値)
0.2~0.5	相当不良
0.5以上	最も不良
1.0 (大気圧換算値)	装置内の二酸化炭素分圧が0.01キログラム毎平方センチメートルを超えてはならない (高気圧安全基準 第24条2項)

(設備と管理 1981年9月より引用改変)

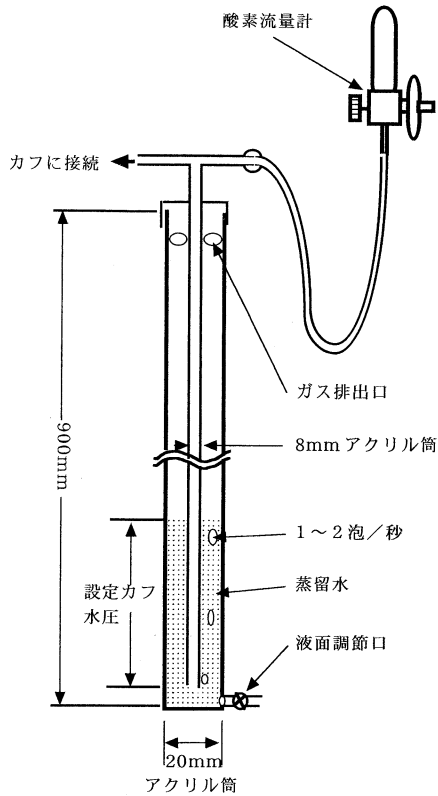


図5 自動カフ圧調節器

までの体積を約5Lとすると、約1.6回となる。本来、換気に必要な酸素流量はCO₂ガス分析計を指標として決定すべきであり、現在その方法を検討中である。

5. カフ圧自動調節器・PEEP ボトル

気管内挿管チューブカフ内の気体は、変圧によって収縮・膨張する。このような現象を防止するためカフ内を液体で満たして対処することが提唱されていたが、この煩雑さとカフ破損の際のリスクと破損の指標が得られないため、50ml ガラスシリジンを改造して重畳式のスライド式簡易自動カフ圧調節器を自作して使用してきた³⁾⁴⁾⁷⁾。

このシリジンをを用いた自動カフ圧調節器は、充分使用に耐えるものであったが、さらに確実な圧調整と良否の指標が得られ、かつ、治療中でもピンホールなどによるカフ漏れは十分に補償できるように水柱圧を利用して、より簡便なカフ圧自動調節器^{図5}を透明なアクリルパイプを用いて自作

した。

PEEP ボトル⁸⁾は、溺水などの患者の無気肺、肺水腫を防止するために作成した。

原理・構造は、上記のカフ圧自動調節器とほぼ同じである。病室からHBOに移動の際も外す事無く一環して使用できるのが特徴で、High Flow CPAPを用いている。

おわりに

紙面の関係上、HBO治療の基本である呼吸関係の機器・器具についてのみ報告した。

HBO内での機器・器具の使用の難しさは、大気圧下においても専門的知識を必要とする他の生命維持管理装置を異空間とも言える環境条件下に組み合わせることで、より一層系が複雑となることにある。また、医療機器の発達によってペースメーカーのように必然的に持ち込まなければならない機器にも対応が求められるようになってきた。しかし、現状では冒頭に書いた背景により、筆者ら自身がより良い治療効果を求めて実験と試作を何度も重ねて自作した前記の器具もPL法・安全対策上からは、独断的である可能性が無いとは言い切れない。臨床工学技士法では、臨床工学技士は医学的知識と工学的知識を併せ持つ資格として定められ、その業務の適正な運用と資質の向上を図り、もって医療の普及、および向上に寄与しなければならない⁹⁾と記述している。他の生命維持管理装置に携わっている技士は、上記の目的のため臨床工学の視点に立った学術団体として独立した立場で、既に、また、新たに目的を同じくする学会や関連団体の協賛を得た独自の活動を活発に開始している。

医療機器は今後、益々高度かつ複雑となる。繰り返すが、HBOは異空間であり、その中では簡単な機器・器具すら複雑な系となり、高度な専門知識が必要となる。HBOに携わっている技士も同視点に立って時代の流れに即応する学術活動を独自で行う独立した学術団体が絶対に必要であると思う。その上で目的を同じくする学会や安全協会の協賛の下に職種に関係なく、メーカーやHBOに関係する全ての方々自由に参加できる都道府県単位のきめ細かい勉強会の開催と、共通の学術的見地を礎に本当の安全対策の確立と啓蒙活動が急務であると筆者は考えている。

最後に、23年間に亘り、高気圧酸素治療の本当の難しさとそれゆえの“やりがい”を問題点の解決を通して常に一緒に暖かく、心強いご指導を身を以てご教授下さり、ご多忙中にも拘らず、快く最後のご校閲の労を賜った師・野口照義先生に心より深く感謝と御礼を申し上げます。

【参 考 文 献】

- 1) 鈴木英一, 日沼吉孝 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, 26(4); 201-206, 1991
- 2) 森 幸夫, 戸崎 剛; 圧力自動補正機能を備えた定流量制御弁の開発, 日本高気圧環境医学会雑誌, 31 (1); 60, 1996
- 3) 勝本淑寛, 伊東範行, 野口照義; 高気圧酸素治療室内における呼吸管理上の2, 3の工夫, 日本高気圧環境医学会雑誌, 18; 48-49, 1985
- 4) 野口照義; 救急医療と高気圧酸素療法, 日本高気圧環境医学会雑誌, 20 (1); 25-37, 1985
- 5) 吉矢生人, 土井康司; 高気圧環境における気管チューブの抵抗, 日本高気圧環境医学会雑誌・論文集, 1・2; 46-49, 1968
- 6) オーム社; 設備と管理, 15(10); 147-148, 1981
- 7) 勝本淑寛; スライド式自動カフ圧調節器, Clinical Engineering, 4(5); 374-377, 1993
- 8) 勝本淑寛; すぐに組み立てられる PEEP ボトル, Clinical Engineering, 4(8); 607-613, 1993
- 9) 厚生省健康政策局医事課編; 臨床工学技士法・義肢装具士法の解説, 中央法規出版; 43, 1988