

●原 著

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鈴木英一* 日沼吉孝* 波出石弘*,**
西野京子*** 安井信之**

高気圧治療中の酸素流量と吸気酸素濃度について検討した。酸素流量は治療圧の平方根に逆比例して低下した。吸気酸素濃度は大気圧下に比べ2気圧下で12%低下していた。これらの低下の原因として高気圧環境にしたことによる流体密度の増加が考えられた。これらの低下は、酸素を供給するためのデマンドバルブ2次圧を計算式で求めた値まで上げることにより補うことができた。

キーワード：多人数用高気圧治療装置，酸素流量，吸気酸素濃度，デマンドバルブ2次圧

The decrease of oxygen flow and oxygen fractional concentration in inspired gas during hyperbaric oxygenation.

Eiichi Suzuki* Yoshitaka Hinuma* Hiromu Hadeishi*,** Kyoko Nishino*** Nobuyuki Yasui**

*Division of Hyperbaric Medicine

**Department of Surgical Neurology

***Department of Anesthesiology, Research Institute for Brain and Blood Vessels Akita

The decrease of oxygen flow and oxygen fractional concentration in inspired gas (F_iO_2) during hyperbaric oxygenation, is reported. The oxygen flow volume measured under hyperbaric condition, decreases in inverse proportion to the square root of treatment pressure. F_iO_2 measured under 2ATA decreases about 12% in comparison with that of 1ATA. We concluded that those decrease were caused by the increase of gas density as fluid. These decrease were revised by control with 2nd pressure of Demand valve for oxygen supply, using the formula reported in this paper.

Keywords : _____

Multiplace Chamber

Oxygen flow

Oxygen fractional concentration in inspired gas

2nd pressure of Demand valve

はじめに

大気圧よりも高い気圧環境の中に患者を収容し、この患者に高濃度の酸素を吸入させることによって、病態の改善を図る高気圧酸素治療は、その性格上様々な物理学的な影響を受ける。高気圧環境下における酸素流量の低下もそのひとつであるが、このことは考慮にいれられず治療を行っているのが現状である。そこで、本稿では高気圧環境下での酸素流量の低下の割合とそれが吸気酸素濃度に及ぼす影響の程度を明らかにし、その解決策を報告する。

前提となる理論

1. 高気圧下で酸素流量が低下すると考えられる理由

流量は流速に断面積を掛けることによって求めることができる。大気圧下と高気圧下での流量を求めるためには、断面積は変化しないため、流速

*秋田県立脳血管研究センター高気圧酸素治療室

**秋田県立脳血管研究センター脳神経外科

***秋田県立脳血管研究センター麻酔科

を求めればよいことになる。

流速を求めるための基本的な方法は Bernoulli の定理を用いるものである。この定理により、流れが定常で、速度が音速より充分小さく、したがって非圧縮性流体とみなせる場合は(1)式が成立する¹⁾。

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

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ると圧力に比例する。したがって、高気圧状態にする程流量は低下し、(3)式の関係が成立する。

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

(治療圧の単位は ATA)

2. 加湿器付属の流量計の指示が下がらない理由

前述のように高気圧治療中は流量が低下しているため、治療室内の加湿器付属流量計の指示は下がるはずである。にもかかわらずその指示は治療前に流量設定した時と変わらない値を示していることをよく経験する。この様子を説明するために Fig. 1 のモデルを考える。

図において球は吹出し口からの一様な流れの気体より受けた抵抗で浮いているものと考えることができる。この抵抗は次式で表される¹⁾。

$$D = C_d \cdot S \cdot \rho V^2/2 \dots\dots\dots(4)$$

D : 球の受ける抵抗

C_d : 抵抗係数

S : 球の断面積

ρ : 密度

V : 流速

(4)式において抵抗係数はほとんど変化しないため¹⁾、抵抗は密度と流速の関数となる。高気圧治療中では流速Vは(2)式より $1/\sqrt{\rho}$ に比例することが示されているため、密度に関係する項は打ち消しあうことになり圧力が影響する項はなくなり、結局、高気圧環境下になっても球の受ける抵抗は大気圧下と同じ値となり、加湿器付属流量計の指

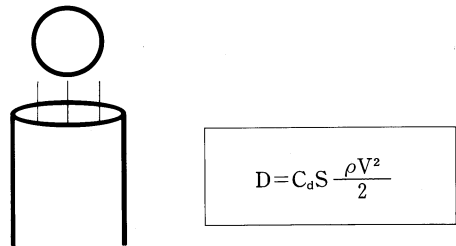


Fig. 1 流量計のモデル

示は下がらないことになる。

対象および方法

前述の理論を検証するために酸素流量と吸気酸素濃度について測定を行った。そしてそれは、Fig. 2 に示す酸素供給システムのもとに行われた。高気圧治療装置には、第2種高気圧治療装置である川崎エンジニアリング社製 KHO-400S を用いた。酸素は病院の液体酸素タンクより2次減圧して4 kg/cm² Gの圧力にしたものをデマンドバルブを通して治療室内のアウトレットより供給されている。このデマンドバルブにより、酸素を供給する圧力であるデマンドバルブ2次圧と治療室内の圧力差は常に一定になり、治療室内の圧力が上がればその分デマンドバルブの2次圧も上がる仕組みとなっている。

1. 酸素流量測定

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浸し、このビンの中に管を入れ酸素を流してビンの中の水が酸素に置き換わるまでの時間を計る。この操作を5回繰り返してその平均時間より流量を求めた。

2. 吸気酸素濃度測定

対象は正常人および突発性難聴患者10名(男6, 女4)。年齢は29歳から71歳, 平均46歳であった。

方法はサンプルチューブを患者の鼻孔に0.5から1 cm 挿入して呼吸ガスを採取しオメガ社製4700オキシキャップを用いて連続測定した。高気圧治療中の吸気酸素濃度は質量分析計用のラインを用いて治療装置外に導き、同様に測定を行った。なお、測定は治療前10分間、治療中は10分から40

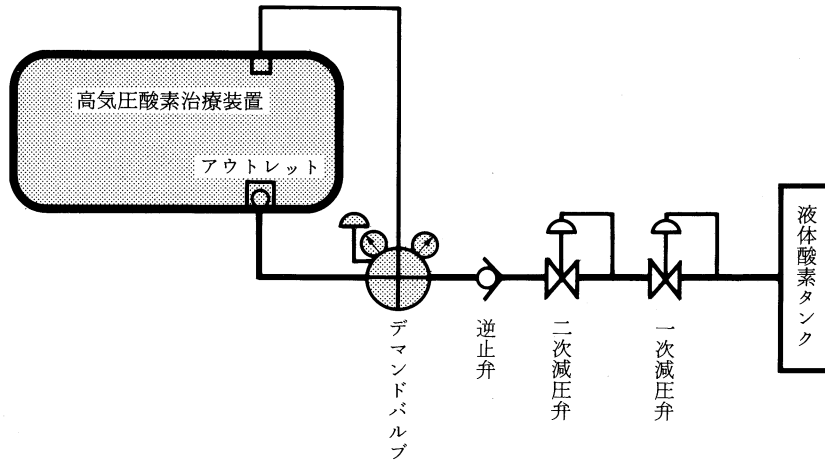


Fig. 2 酸素供給システム

分間それぞれ吸気酸素濃度が安定してから行った。患者への酸素投与はバード社製インスピロン酸素マスクを用いて加湿器付属流量計で15l/minに設定して行った。

結果

1. 酸素流量測定結果

表1に示すように1.5気圧、2気圧と高気圧にするほど酸素流量は低下し、それは、理論値と一致していた。

2. 吸気酸素濃度測定結果

表2に示すように大気圧下に比べ2気圧下では平均12%の低下を認めた。

考察

大西らは、ワンマンチャンバーに質量分析計を用いた呼吸ガスの連続監視システムを接続して高気圧治療中の吸気酸素濃度を測定した。彼らは空気加圧下で酸素マスクを用いて酸素投与を行う場合、一定の吸気酸素濃度を保つには、気圧の上昇に比例して酸素流量を増す必要があると報告した²⁾。しかし、なぜ一定の酸素流量では吸気酸素濃度が低下するのか、また、数学的に気圧と酸素流量が比例関係にあることも確かめられていない。今回の検討により気圧と酸素流量とは直線的な比例関係ではなく、酸素流量と大西らの言うところ

の気圧の平方根に逆比例することが、数式的にも実験的にも確かめられた。そこで、高気圧環境下で大気圧下より低下している酸素流量を大気圧下と同量に保つようにするために以下のことを考えた。

1. 流量低下を補正する方法

流量の低下を補正する方法として、(1)流量計の目盛を各治療圧毎に作り、その目盛に合うように流量を調節する。(2)治療前に流量設定したまま流量調節用のつまみは動かさずに酸素供給圧を上げて流量を増やす。の2つの方法が考えられる。(1)の方法では加湿器付属の流量計であるため最高目盛が15lまでしかなくかつ改造は困難で、また、治療の度に治療室内で調節しなければならず、あまり実用的ではない。(2)の方法によれば、装置の改造も必要とせず、治療室外から流量の調節ができるため大変都合が良い。われわれは、適切な酸素供給圧を求める式として次式を考案した^{付録2)}。

$$Ps_2 = \rho_2 / \rho_1 \times (Ps_1 - Pe_1) + Pe_2 \dots\dots\dots(5)$$

Ps₁ : 治療前のデマンドバルブ2次圧

Ps₂ : 治療中のデマンドバルブ2次圧

Pe₁ : 治療前の室内圧

Pe₂ : 治療中の室内圧

ρ₁ : 治療前の酸素密度

ρ₂ : 治療中の酸素密度

この式で密度は直接計測する必要はなく、たと

表1 酸素流量測定結果

気圧 (ATA)	理論値 (ℓ/min)	実測値 (ℓ/min)
1	15.0	15.1
1.5	12.2	12.2
2	10.6	10.6

表2 吸気酸素濃度測定結果

気圧 (ATA)	吸気酸素濃度 (Mean±1SD %)
1	82±4
2	70±7

表3 補正後の酸素流量および吸気酸素濃度測定結果(治療前デマンドバルブ設定圧1 kg/cm² G)

気圧 (ATA)	酸素流量 (ℓ/min)	吸気酸素濃度 (Mean±1SD %)
1	14.9	82±4
2	16.0	82±4

表4 補正後の酸素流量測定結果(治療前デマンドバルブ設定圧4 kg/cm² G)

気圧 (ATA)	酸素流量 (ℓ/min)
1	15.1
2	15.8

表5 呼吸数および呼気終末炭酸ガス濃度の変化

気圧 (ATA)	呼吸数 (Mean±SD)	呼気終末炭酸ガス濃度 (Mean±SD %)
1	15.0±1.8	4.81±0.46
2 (流量補正前)	14.9±1.0	2.24±0.18
2 (流量補正後)	15.1±1.1	2.18±0.15

例えば2気圧の場合は単純に ρ_2/ρ_1 を2に、3気圧の場合は3にすることで近似できる。また、圧力の単位をゲージ圧にすれば P_{e1} はゼロとなり、より簡単に計算できる。

この式より求めた治療中のデマンドバルブ2次圧を用いて測定した結果を示す。

2. 補正後の酸素流量および吸気酸素濃度測定

1) 治療前のデマンドバルブ2次圧1 kg/cm² Gの場合

(5)式より2気圧下のデマンドバルブ2次圧を3 kg/cm² Gにした時の酸素流量および吸気酸素濃度の測定結果を表3に示す。このように、治療前の酸素流量より多少多めではあるが良好な測定値を得ており吸気酸素濃度も治療前と変わらない値を示

している。大気圧下より多めになった理由としては、(5)式において、密度や圧力を実測せずに ρ_2/ρ_1 を2に、 $P_{s1}-P_{e1}$ を1というように近似値を用いたためと思われるが実用的には、吸気酸素濃度の値からもわかるようにまったく問題ないと思われた。

2) 治療前のデマンドバルブ2次圧4 kg/cm² Gの場合

酸素源の第一次減圧8 kg/cm² Gの所から直接分岐配管によって高気圧治療室内の酸素アウトレットへ酸素供給を行い、治療前のデマンドバルブ2次圧は4 kg/cm² Gに設定して使用している施設も多いと思われる³⁾。そのような施設では、2気圧下で治療中のデマンドバルブ2次圧は(5)式により9

kg/cm² G にしなければ治療前と同じ流量は得られない。この場合、第一次減圧の圧力設定を 9 kg/cm² G まで上げるか、治療前のデマンドバルブ 2 次圧を 3 kg/cm² G くらいまで下げるかのどちらかを選択することとなるが、後者の方が実用的であろう。ここでは酸素ポンプから酸素を供給し、治療前のデマンドバルブ 2 次圧を 4 kg/cm² G に、2 気圧下でのデマンドバルブ 2 次圧を 9 kg/cm² G に設定し測定した結果を表 4 に示す。この測定結果より治療前より多少多めではあるが良好な値が得られていることが確かめられた。

3. 吸気酸素濃度に及ぼす流量以外の要因

マスクを用いて呼吸を行っている場合、吸気酸素濃度は酸素流量と被験者の呼吸状態の影響を受ける。被験者の呼吸数もしくは 1 回換気量が増えて設定された酸素流量で充分でなくなった時、密着度のあまりよくないマスクでは室内の空気がはいりこみ吸気酸素濃度が下がると考えられる。表 5 に今回の検討時に測定した呼吸数および呼気終末炭酸ガス濃度の結果を示す。2 ATA において炭酸ガス産生量と呼吸状態が変化しないなら呼気炭酸ガス濃度の測定値は 1 ATA の半分になるはずである。しかし、今回の測定値は半分よりやや低値を示している。この結果より呼吸数が増えているため 1 回換気量が増していることが考えられる。酸素流量補正前の吸気酸素濃度が 70% になったことの原因は酸素流量の低下の他に被験者の換気量増加の影響も否定できない。しかし、同じ 2 ATA において酸素流量を補正した後も、呼気炭酸ガス濃度は 1 ATA より低めではあるが吸気酸素濃度が 1 ATA と同じ値を示していることより、吸気酸素濃度の低下の要因として換気量が増えたことよりも酸素流量が低下したことの影響が大きかったと考えられる。

今回測定した呼気終末炭酸ガス濃度が全体的に低めなのは呼吸ガスを鼻孔より 0.5 から 1 cm のところにサンプルチューブを固定し吸引して測定しているため、呼吸ガス以外のマスク内のガスもはいりこんでいる可能性が考えられる。これは鼻腔へサンプルチューブを奥深く入れることで防げられると思われるが被験者に痛みや不快感を与えないため、今回は浅めに挿入して測定を行った。

4. その他

今回の検討で、現状の様に高気圧下の酸素流量

の低下を無視して治療を行った場合、今回の条件設定のもとでは 2 気圧で約 12% の吸気酸素濃度の低下を認めた。この値は治療前の酸素流量設定や使用するマスクにより上下するであろう。しかし、多かれ少なかれ低下した酸素流量により吸気酸素濃度は低下する。また、日本高気圧環境医学会の定める安全基準の中の治療指針では、ほとんど全ての適応疾患に対し吸入気として 100% の酸素を要求している。これに対し、今回の検討では治療前酸素マスクを付けた状態で平均 82%、2 気圧下における治療中は平均 70% という値を得た。これらの値が、治療効果にどの程度影響を及ぼすかは不明であるが、われわれは患者に不快感を与えない範囲内で高濃度の酸素を投与すべきと考えている。治療前の吸気酸素濃度は使用マスクを替えることおよび酸素流量を増やすことでもっと高い値を得ることができる。しかし、装着感が劣っていたり、呼吸時の抵抗感があつたりするため、現在は今回の検討で使用したインスピロン酸素マスクを多用し、流量はリザーババックが膨らんでいる程度に設定して使用している。また、マスクを装着する場合でも漫然と装着するのではなく、1 回目の治療前に吸気酸素濃度を測定して適切な濃度が得られているか確かめ、得られていない場合はマスクが顔にぴったり合うように工夫して使用することも大切である。

治療中の吸気酸素濃度については、前述したとおりデマンドバルブ 2 次圧を上げるという簡便な操作により治療前の値まで上昇させることが可能である。

ま と め

1. 高気圧治療中の酸素流量は、治療前に比べ治療圧の平方根に逆比例して低下する（治療圧の単位は ATA）。
2. 治療中の酸素流量の低下はデマンドバルブ 2 次圧を次式で得られる値まで上げることによって補うことができる。

$$Ps_2 = \rho_2 / \rho_1 \times (Ps_1 - Pe_1) + Pe_2$$

Ps_1 : 治療前のデマンドバルブ 2 次圧

Ps_2 : 治療中のデマンドバルブ 2 次圧

Pe_1 : 治療前の室内圧

Pe_2 : 治療中の室内圧

ρ_1 : 治療前の酸素密度

ρ_2 : 治療中の酸素密度

〔付 録 1〕

抵抗係数はレイノルズ数の関数として与えられる。また、流体中の球のレイノルズ数は次式で計算される¹⁾。

$$Re = Vd/\nu \dots\dots\dots(6)$$

Re : レイノルズ数

V : 流速

d : 球の直径

ν : 動粘性係数

また、 ν は次式で表される⁴⁾。

$$\nu = \eta/\rho \dots\dots\dots(7)$$

ν : 動粘性係数

η : 粘性係数

ρ : 密度

酸素の粘性係数⁵⁾は0°C 1気圧で $1.93 \times 10^{-5} \text{kg/m}^2/\text{sec}$ 、酸素の密度⁶⁾は、0°C 1気圧で 1.429kg/m^3 であり、これらの値を用いて計算すると、動粘性係数は $1.35 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{sec}$ となる。次に、流量計の球の直径を5 mm、酸素の流量 15l/min 、流量計内の酸素流出口の直径を8 mm、流速Vは流量を断面積で割ればよいから、約5 m/secとして、レイノルズ数を(6)式より計算するとレイノルズ数は 1.85×10^3 となる。

次に高気圧環境下では、粘性係数は数気圧になってもあまり変化しないため⁵⁾、よって2気圧の場合では動粘性係数は大気圧下の1/2となる。流速は前述の通り $1/\sqrt{2}$ となるから、レイノルズ数は $\sqrt{2}$ 倍となり 2.5×10^3 となる。また、3気圧の場合は、同様に $\sqrt{3}$ 倍になるだけである。前述のように抵抗係数はレイノルズ数の関数で、かつ、レイノルズ数が 10^3 から 10^5 の範囲では約0.44と一定の値をとるため¹⁾、高気圧治療中もほとんど変化しない。

〔付 録 2〕

前提となる理論のところでも示した(1)式において、静圧Pは治療室内圧Peに、そして、総圧P₀

を酸素供給圧であるデマンドバルブ2次圧Psと考えると次式の様に記述できる。

$$Pe + \rho V^2 / 2 = Ps \dots\dots\dots(8)$$

Pe : 治療室内圧

Ps : デマンドバルブ2次圧

ρ : 密度

V : 流速

これより流速Vを求めると次式となる。

$$V = \sqrt{2(Ps - Pe)/\rho} \dots\dots\dots(9)$$

ここで、治療前および治療中のそれぞれの変数を以下の様に記述する。

Pe₁ : 治療前の治療室内圧

Ps₁ : 治療前のデマンドバルブ2次圧

ρ_1 : 治療前の酸素密度

V₁ : 治療前の流速

Pe₂ : 治療中の治療室内圧

Ps₂ : 治療中のデマンドバルブ2次圧

ρ_2 : 治療中の酸素密度

V₂ : 治療中の流速

治療前と治療中での流量を等しくするためにはV₁=V₂が成立しなければならない。

$$V_1 = V_2 \dots\dots\dots(10)$$

(9)式と(10)式より次式が得られる。

$$\sqrt{\frac{2(Ps_1 - Pe_1)}{\rho_1}} = \sqrt{\frac{2(Ps_2 - Pe_2)}{\rho_2}} \dots\dots\dots(11)$$

(11)式よりPs₂を求めると次式となる。

$$Ps_2 = \rho_2/\rho_1 \times (Ps_1 - Pe_1) + Pe_2 \dots\dots\dots(5)$$

〔参 考 文 献〕

- 1) 谷 一郎, 小橋安次郎, 佐藤 浩: 流体力学実験法. 岩波書店, P106-119, 1977
- 2) 大西春樹, 他: 高気圧治療中の生体モニタリング. 日高圧医誌16: 89-97, 1981
- 3) 佐藤 暢: 医療ガスの安全性について. 日高圧医誌24: 227-233, 1989
- 4) 松平 升, 大槻義彦, 和田正信: 物理学I. 培風館, P128-130, 1975
- 5) 国立天文台編集: 理科年表. 丸善, P448, 1991
- 6) 飯田修一, 大野和郎: 物理定数表. 朝倉書店, P30, 1978