

●講 座●

呼吸管理のデバイス

吸入酸素療法 [2回連載]

②インターフェイスを中心に

尾崎孝平¹⁾・山口和之²⁾・安田あかり¹⁾

キーワード：FiO₂ と FdO₂，低流量デバイス，高流量デバイス，リザーバー，加湿ガス，流量抵抗と流量制限

I. はじめに

吸入酸素療法を実施する際にどのようなインターフェイスを適応すべきかは現在まで明確には示されていない。また、それぞれのインターフェイスの問題点も充分には説明されておらず、不適切な使用も散見される。そこで第2回ではこれらについて言及する。

II. 酸素療法の目的

酸素療法は組織の低酸素症 (hypoxia) を改善するために重要な役割を果たすが、吸入酸素濃度を上昇させるだけでは、低酸素症のすべて改善することはできない。細胞側から大気側まで順にその要因を列挙してみると表1になる。吸入酸素療法は「とりあえず酸素」という安易な発想で開始される場面が多いが、効果が期待できるものとそうでないものがある。

さらに、不用意な吸入酸素療法の問題点は多数指摘

されており、高い経皮的酸素飽和度 (SpO₂) を容認する行為は慎むべきである¹⁾。吸入酸素濃度を上昇させる行為は、動脈血酸素分圧 (PaO₂) を上昇させるが、SpO₂ が99～100%に達すると動脈血酸素含量のさらなる増加はほとんど見込めない。

一方、医療機関内ではSpO₂が90%未満になると何らかの対応を迫られることが多い。しかし、真に危険が迫る状況であるか否かはSpO₂の値だけでは判断できない。たとえば、富士山頂では健常成人のSpO₂は80%程度になるが、多くの登山者は安静に景観を見ているだけでは重篤な低酸素症症状を呈することはない。しかし、運動すると呼吸は促進し低酸素症の症状が容易に出現する。つまり、組織における酸素の需要と供給のバランスが低酸素症の症状出現には深くかかわっている。「酸素供給は少ないが酸素需要も少ない」場合には低酸素症症状は出ないが、「酸素供給があまり増えない状況で酸素需要が急増する」状態では低酸素症が出

表1 組織低酸素血症の原因と吸入酸素療法の効果

組織低酸素症の原因	その因子および部位	吸入酸素療法の効果
細胞呼吸の障害	ミトコンドリア・細胞質	×
組織血流低下	毛細血管血流障害・心拍出量低下	×
動脈血酸素含量低下	貧血・低酸素血症・一酸化炭素中毒	△
低酸素(分圧)血症	肺胞低換気・ガス交換不全(シャントなど)	△
吸入大気の異常	低酸素分圧(高高度)・低酸素濃度	○

1) 神戸百年記念病院 麻酔集中治療部

2) 大和高田市立病院 呼吸器内科

現する。酸素療法はあくまでも適正な組織の酸素化を目的として実施されるべきである。

SpO₂ はバイタルサインの1つとまで言われるようになり、酸素療法を実施する際の目標 (target) として使用することが推奨される¹⁾。SpO₂ が換気の指標でないことは言うまでもないが、呼吸不全に対する人工呼吸の開始が酸素療法下の SpO₂ 値を考慮して決定されていることが多いために、人工呼吸開始が遅れる場面にしばしば遭遇する。低酸素血症の改善を目的に吸入酸素療法が開始されることは間違いではないが、人工呼吸の適応は低酸素血症の所見だけでなく、むしろ呼吸筋疲労などの換気不全をより重視する必要があることを忘れてはならない。

Ⅲ. 吸入酸素療法用のデバイス

吸入酸素療法は、広義では人工呼吸器回路 (閉鎖回路) で投与される大気と酸素の混合気投与も含まれる。しかし、一般的には吸入酸素療法は開放型のデバイスで投与される酸素療法を指す。

吸入酸素療法用のデバイスには低流量と高流量のデバイスに大別される。ときとして中流量というカテゴ

リーが紹介されるが、その定義は明確でない。筆者は成人の安静時最大吸気流量が1つの基準 (コラム参照) であると考え、30~50L/分の以上の流量を可能にするものが高流量タイプと考える。一応、私案であるが以下のように考える。

低流量デバイス：100%酸素を使用するタイプ、
15L/分以下の流量に対応する
高流量デバイス：酸素濃度設定が付くもので、
30L/分以上の流量に対応する

この分類では高流量デバイスと低流量デバイスがカバーする流量範囲に連続性がない。しかし、純酸素でしか投与できないデバイスなのか否かという観点で考えると理解しやすい。たとえばリザーバマスクは最大15L/分の酸素流量での使用が可能であるが、純酸素使用のデバイスという観点からは低流量に分類できる。個人的には「流量」でのクラス分けに固執する意味は少ないと考える。実際に英国では達成可能な吸入酸素濃度によって、高濃度酸素療法用 (high concentration oxygen therapy) と中等度濃度酸素療法用 (medium

コラム 安静時吸気流量 (成人)

吸気流量 (単位はL/分) の考え方について簡単に解説する。初心者でこの概念の理解が乏しいことにしばしば気づかされる。

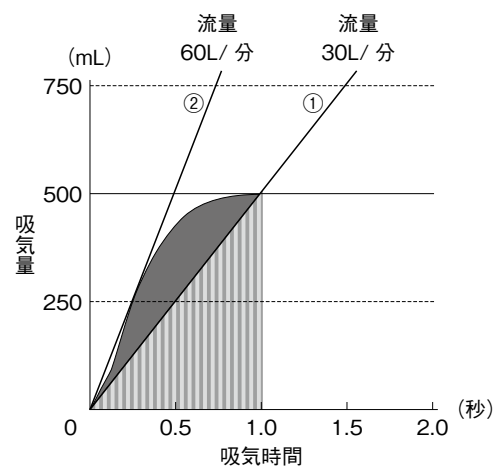
いま、成人の一回換気量 (Vt: volume of tidal) を500mL、これを1秒間で吸気すると、その吸気流量は単純計算では以下になる。

$$500\text{mL}/\text{秒} = 0.5\text{L}/1/60\text{分} = 30\text{L}/\text{分}$$

ただし、30L/分は一定流量で送気する旧式人工呼吸器の吸気流量の表現、もしくは平均吸気流量ならば適正であるが、自発呼吸の吸気流量は吸気中一定ではない。

吸気相の極初期に緩徐に吸気が開始され、その後すぐに吸気流量は急速に大きくなり最大吸気流量を迎え、吸気終末にかけて吸気流量は減少し、呼気に転じる (図1: 次ページ)。

吸気量でイメージ表現するとコラム図になる。一定流量30L/分が供給する吸気量は線①以下の三角形の範囲になる。しかし、急激に立ち上がる自発呼吸では一定の吸気流量を示さない。自発呼吸で吸気量500mLに達するまでの吸気量の増加は速く、赤で示す範囲の外郭をたどる。したがって、30L/分の流量で100%酸素を患者の鼻先に流しても、赤で示す範囲の吸気量は周辺大気を吸気することになる (FiO₂ < F_DO₂)。投与する酸素だけを吸気させるためには患者の最大吸気流量を凌駕する流量が必要になる。コラム図の吸気パターンならば線②の流量 (この図なら60L/分) が必要となる計算になる。すなわち、この吸気パターンで60L/分以上の流量で酸素を患者の鼻先に流すこと可能ならば FiO₂ = F_DO₂ となる。しかし、自発呼吸では吸気流量は一定でなく、換気量が増えたり、努力吸気したりするとその最大吸気流量は簡単に大きくなり、また変化にも富む。吸入酸素療法では、机上の理論で吸入酸素濃度を規定することは大変に困難であることを理解しておかなければならない。



コラム図 吸気量と酸素流量の関係

©K. Ozaki : ICU Risk Management News No.1 Vol.4

表2 低流量・高流量それぞれで使用されるデバイス

●低流量デバイス（純酸素使用デバイス）
カニューラ（鼻カスラ）（リザーバー有無）
単純顔マスク
開放型マスク（ディフューザータイプ）
リザーバーマスク（再呼吸・非再呼吸）
●高流量デバイス（酸素濃度調節デバイス）
ベンチュリーマスク
高流量ネブライザーマスク

oxygen concentration therapy) に大別され、前者にはリザーバーマスクと high flow nasal cannula (HFNC)、後者にはそれ以外が入る¹⁾。

それぞれで使用されるデバイスを表2に示す。なお、本稿ではHFNCについては言及しないので、別特集²⁾を参照されたい。

Ⅳ. 吸入酸素濃度 (FiO₂)

1. 患者の吸気流量と吸入酸素濃度との関係

上記の低流量タイプ、高流量タイプはともにすべて開放型デバイスで、正確に吸入酸素濃度を規定することは困難である。リザーバーを持たない開放型デバイスにおいて吸入酸素濃度を規定できる条件は、投与するガス流量が患者の最大吸気流量を上回った場合のみである(図1)。しかし、自発呼吸では吸気流量は一定ではなく変動する。そして、呼吸不全や代償性過換気では最大吸気流量は容易に100L/分以上になるために、高流量デバイスを使用しても吸入酸素濃度は規定できず FiO₂ < F_DO₂ (投与酸素濃度 D : delivery) になる。

したがって、低流量デバイス（純酸素使用デバイス）

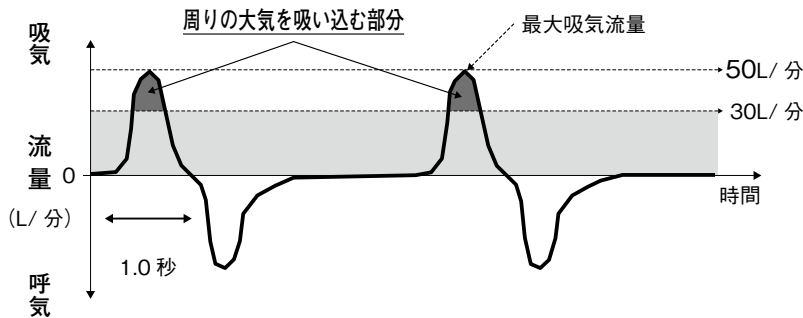


図1 ある患者の吸気流量と吸入酸素流量の関係

患者の流量曲線の吸気側（流量0より上側）では、30L/分のガス流量（下破線）では図中の赤色の部分（30L/分より大きい部分）の吸気量を周辺大気から吸気することになる。よって FiO₂ < F_DO₂ になる。しかし、患者の最大吸気流量を上回る 50L/分のガス流量（上破線）では患者吸気はすべてガス流量で賄われるために FiO₂ = F_DO₂ になる。言い換えると、この例では患者の最大吸気流量が 50L/分以上になれば FiO₂ < F_DO₂ になる。とくに努力呼吸をする呼吸不全では最大吸気流量が非常に大きいため、多くの症例で FiO₂ < F_DO₂ となる。

の投与酸素濃度 (F_DO₂) は 1.0 であるが、その流量は少ないために患者吸気には必ず周辺大気が含まれる。そして、FiO₂ は投与される酸素流量 (100%) と周辺大気 (20.9%) の混合割合で変化する。つまり、ホースで水を掛けるように、単純に酸素を患者の鼻先に流す場合には FiO₂ を規定する因子は以下になる。

①投与酸素濃度 (F_DO₂)

(低流量では 1.0、高流量では出口酸素濃度)

②酸素流量

(③に近づくほど大気の混入は少なく FiO₂ は上昇)

③患者吸気流量

(②に近いほど大気の混入は少なく FiO₂ は上昇)

2. リザーバー機能

実際にはほとんどのデバイスはリザーバー機能を有している。回路に別途リザーバーを設けるタイプ（リザーバー付カニューラやリザーバーマスク）は言うまでもないが、それ以外のデバイスでもリザーバー機能を有する。たとえば、マスクで酸素を投与する場合には、マスク内が酸素リザーバーとして機能する。マスク内に貯留した呼気は次の吸気で再呼吸されるが、呼気中にマスク内に流入する酸素が呼気を洗い流すことによってマスク内が酸素のリザーバーとして機能する。これによって単純に酸素を口元に流す場合より次の吸気の FiO₂ を上昇させることが可能になる。さらにデバイスがリザーバーとして機能するだけでなく、生体腔である上気道内腔をリザーバーとして機能させるものも

表3 吸入酸素濃度を規定する因子

機械側因子	
①投与酸素濃度 (F _D O ₂)	
②酸素流量	(④に近づくほど大気の混入は少なく F _I O ₂ は上昇)
③リザーバー容量 (実際にリザーバーとして機能する量が多いと F _I O ₂ は上昇)	
患者側因子	
④吸気流量	(②に近いほど大気の混入は少なく F _I O ₂ は上昇)
⑤一回換気量	(リザーバー容量 / 一回換気量の割合大きいと F _I O ₂ は上昇)
⑥呼気相時間	(リザーバーに酸素が貯留する時間が長いと F _I O ₂ は上昇)

少なくない。たとえば鼻カニューラも鼻腔内に酸素を吹き込むことによって鼻咽頭腔をリザーバーとして機能させている。このために吸入酸素濃度を規定する因子は表3のようになる。

上記の因子を考慮したマスクがリザーバーマスクであり、酸素流量 15L/分 で吸入酸素濃度として 80～90%が達成できると解説される。しかし、完全にマスクが密着しない場合には 50～60%の吸入酸素濃度しか達成できず、単純顔マスクで酸素流量 10～15L/分 で使用する場合と酸素化が大きく変わらない場合が少なくない。リザーバーマスクでは次の a～d の条件をすべて満たす場合には、理論的には吸入酸素濃度 80～90%を達成できるが、臨床的に達成できることは少ないと考える。

- 一回換気量を上回る十分なリザーバー容量がある
- 再呼吸を起こさない酸素流量がある
- 弁付ならば一方弁機能が担保されている
- マスク外大気を吸気させないマスクの密着度がある

V. 吸入酸素濃度の予測

吸入酸素のデバイスには流量ごとに目安となる吸入酸素濃度が慣習的に示される。しかし、患者の呼吸パターンによって吸入酸素濃度が容易に変化することは前述の通りである (図1)。これらの目安は成人が安静呼吸をしている場合を想定しているが、吸入酸素療法を必要とするのは呼吸不全患者であり、多くの患者では吸気流量は安静時よりも増加している。代償性に一回換気量を増加させたり、努力性の胸式吸気をしたりとすると吸気流量は容易に 100L/分以上になるために、目安の吸入酸素濃度を過信することは非常に危険である。いまだに酸素療法のテキストに目安の吸入酸素濃度が掲載され続けることに筆者は疑問を禁じ得ない。

パルスオキシメータが普及し SpO₂ はバイタルサインの1つとまで言われる現代では、目標飽和度 (target saturation) を維持するようにデバイスと流量を変化させていく方式が採用されるべきである¹⁾。本稿はデバイスについての解説であるので、参考文献に、英国胸部疾患学会の酸素療法における実施要綱・重要勧告事項サマリー³⁾を明記したので参照されたい。

また、デバイスを提供する企業側は、非常に限定的な実験データをもとに、高い吸入酸素濃度を維持でき、あたかも広い適応があるように示すことが多いので注意すべきである。たとえば、デバイスのシミュレーション条件として、モデル肺の換気設定を 16 回/分、一回換気量 600mL、定流量吸気で吸気相:呼気相比 1:1 を採用している実験モデルを検証してみる。すると、吸気時間は 1.9 秒 (60 秒 / 16bpm/2) になり、吸気流量は約 19L/分 ((0.6L/1.9 秒) × 60) となり、一回換気量 600mL の成人自発呼吸としてはあり得ないほど少ない吸気流量での条件でのデータが示されていることになる。この実験データでは、ガス流量が 19L/分以上では F_IO₂ ≒ F_DO₂ となるために、非常に酸素化のよいデバイスであるという誤った結果が示されてしまう。

VI. 加湿の問題

1. 低流量デバイス

100%酸素は湿度を全く含まないために、純酸素を使用する低流量デバイスでは、加湿が原則必要になる。しかし、低流量デバイスでは加湿されない純酸素がそのまま患者に提供されることが一般的に許容されている。低流量では酸素の加湿をしないという文化がわが国に定着したのは、米国胸部疾患学会が 1995 年に発表したステートメント⁴⁾が強く影響している。すなわち「5L/分以下の低流量での吸入酸素療法では、長期間にわたって自覚症状や症状の重症度に差はみられず、加

湿が必要であるという証拠はない」とした。気泡型加湿瓶を使用しないことが推奨されたわけではないが、病院経営側は経費節約とスタッフの労力軽減のためにこのステートメントに賛同し、院内の気泡型加湿瓶が一気に減った。滅菌水を加湿瓶に頻回に補給する業務が減り、ベッド移動時に加湿瓶や流量計が壊れる事故も減ることは大きな利点と受け止められた。さらにダイヤル式の酸素流量計の普及と相まって、低流量の酸素投与はダイヤル式流量計にチューブ継手を直接装着して酸素を投与する方法が広まった。

実際に 3L/分未満の鼻カニューラからの酸素投与では、室内大気の湿度の方が上気道乾燥に与える影響が大きいことが知られているが、3～5L/分以上では粘膜の乾燥や疼痛を訴える頻度が多くなる⁵⁾。低流量で酸素吸入を実施する際でも、長期的な使用では加湿瓶（気泡型加湿装置）が全く不要とは思われない。現時点では低流量デバイス使用時の加湿の是非については意見が分かれる。

2. 高流量デバイス

ベンチュリーマスクや高流量ネブライザーマスクでは、加湿としてネブライザーミストを利用する。ネブライザーミストは水滴であり湿度とは区別されるものであるが、上気道粘膜の乾燥は防止できる。しかし、マスク内の顔面や鼻腔内に水滴が付着し、不快感の訴えをしばしば耳にする。また、過剰なミストが上気道粘膜の刺激になって咳嗽や喘息が誘発される場合もある。

一方、HFNC は理論的には飽和水蒸気が体温で投与される。加湿面では酸素投与デバイスのなかで最も優れている。すなわち、投与酸素濃度やガス流量にかかわらず十分な加湿が可能である。

このため使用可能ならば、低流量でも HFNC で加湿加湿ガスを投与する施設が増えている。実際に 10L/分未満の流量でも HFNC で酸素投与すると、多くの患者は「鼻が楽だ」という。とくに慢性呼吸器疾患患者では、低流量設定の HFNC で上気道の粘膜乾燥を防止できる。上気道粘膜を湿潤に保つことは喀痰の排出が容易にして¹⁾、嚥下機能にも好影響を与えることが推測される。筆者は低流量であっても乾燥ガスの投与は厳密には非生理的な療法であり、今後可能であれば低流量でも 37℃ 相対湿度 100% に近いガスを投与すべきであると考えられる。

Ⅶ. 呼気（二酸化炭素）再呼吸の問題

酸素を流さずに単純顔マスクを装着すると、死腔が増えて健康被験者では分時換気量は 160% に増加し、酸素を 3L/分でも流しても分時換気量は 140% に増加する⁶⁾。すなわち、単純顔マスクでは 5L/分以下の流量では CO₂（二酸化炭素）の再呼吸を引き起こし、患者の吸気流量増加に伴って吸気抵抗が増す。これら为了避免するために単純顔マスクでは酸素流量は 5～10L/分に調整することが推奨¹⁾されているが、グレード C 推奨に留まる。

よくある勘違いは、CO₂ を再呼吸するので PaCO₂（動脈血二酸化炭素分圧）が上昇するという思い込みである。結論を述べると、単純顔マスクで 5L/分以下の酸素流量であっても健常人や通常の I 型呼吸不全では PaCO₂ の上昇は認めない。つまり、自発呼吸の分時換気量の増加は呼吸中枢が PaCO₂ を正常な換気応答の値に維持しようとした結果であって、換気が代償できているうちは PaCO₂ の上昇は認めない。術後などに一時的に 5L/分以下の酸素流量で単純顔マスクを使用しても、呼吸数や呼吸パターンに問題がなければ、許容できる使用と考える。ただし、少ない流量で十分に酸素化が維持できるのであれば、patient comfort の面からも速やかに鼻カニューラへの変更、酸素投与の中止を検討すべきである。

逆に II 型呼吸不全で PaCO₂ が上昇している患者においては、5L/分以下の酸素流量での単純顔マスク使用すべきではない。また単純顔マスクを 5L/分以上の流量で使用する場合には、吸入酸素濃度が高くなり過ぎることが多く、高 CO₂ 患者ではナルコーシスの危険性を増す。このために単純顔マスクは II 型呼吸不全患者には適さず、ベンチュリーマスクなどで吸入酸素濃度を一定（24～28% の低濃度）に保てる高流量マスクを適応すべきである。

近年、ディフューザー付開放型マスクが CO₂ の再呼吸を少なくし、II 型の慢性呼吸不全に適応があるとされる。これらは大きな側孔を有し、リザーバー効果は少ないものの、ディフューザーから口元に向けて流速（流量ではない）の速い酸素が噴き出すので、リザーバー効果が少なくても一定の吸入酸素濃度が維持される。

注意すべきは、このマスクが達成する吸入酸素濃度は、単純顔マスクより高く、リザーバーマスクに匹敵

し、I型呼吸不全の患者にも優れた適応があるとコマーシャルされる点である。開放型マスクはディフューザーで流速は速くなっても流量は増えていないので、一回換気量や吸気流量が増加する場合には周辺大気を吸気する。すなわち、流速効果が高い利点とリザーバー効果が少ない欠点が相殺されることになり、I型呼吸不全では呼吸パターンによっては吸入酸素濃度の上昇は必ずしも期待できない。

VIII. 各インターフェイス

1. 鼻カニューラ：nasal cannula（鼻カヌラ）（図2）

患者にもっとも侵襲の少ない安楽なデバイスとして認知される。しかし、酸素流量が3L/分を超える患者は鼻の不快を感じるが多くなるために、一般的に最大の使用可能流量は6L/分とされる。吸入酸素濃度は開放系デバイスであり酸素流量によって規定できないが、マスクと比較してCO₂の再呼吸はない。注意すべき点として、カニューラで0.5～1L/分程度の非常に少ない流量であっても、換気量が低下する睡眠障害患



図2 鼻カニューラ

者では睡眠中の吸入酸素濃度が上昇し、CO₂に対する換気応答の悪い患者ではCO₂ナルコーシスに陥る危険性が指摘されている⁷⁾。

2. リザーバー付鼻カニューラ（図3）

カニューラまでのラインにリザーバーが配置される鼻カニューラ。リザーバーは呼気時の流量抵抗で拡張し、次の吸気で定常流量に加えリザーバーの容量が吸気される。単純なカニューラと比較して、より少ない酸素流量で同じ酸素飽和度を維持することが可能になる。したがって、本デバイスは酸素節約を目的に在宅酸素療法（home oxygen therapy：HOT）患者に適応がある。リザーバーは図3のようにカニューラ直前に口髭様に置かれるものとペンダントタイプがあるが、いずれも容量は決して大きくない。また、呼気時に一定の流量抵抗が生じないと所定のリザーバー効果が発揮されない。

3. 単純顔マスク（simple face mask）（図4）

ハドソンマスクなどの俗称もあるが、現在は単純顔

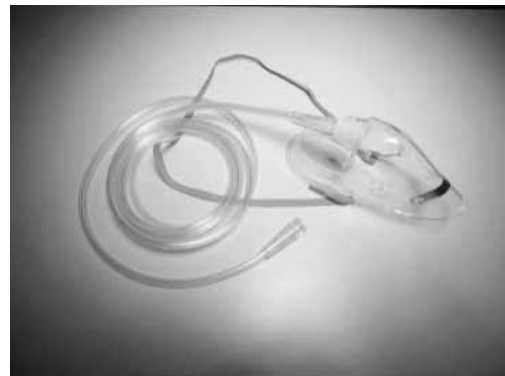


図4 単純顔マスク

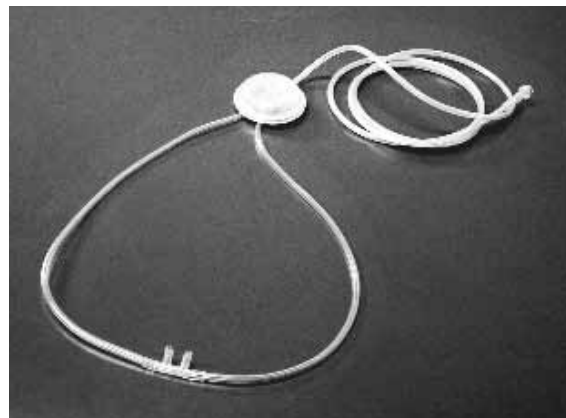


図3 リザーバー付鼻カヌラ

ノーマルタイプ（左）とペンダントタイプ（右）（写真提供：日本ルフト）

マスクに用語統一が進んでいる¹⁾。吸入酸素濃度 40～60%を達成したい時に使用される。しかし、実際の吸入酸素濃度は患者の呼吸パターンで変化し、流量では規定はできない。5L/分以下の流量での使用ではCO₂の再呼吸が増えるのでⅡ型呼吸不全には推奨されない(先述)。

ただし、単純顔マスクは患者に圧迫感や不快を訴える率が高く、自身がマスクを外して酸素療法が継続できなくなることが多い⁸⁾。これに対して患者の多くは鼻カニュラを好み、外す機会が減って酸素療法が継続されやすくなることが報告されている⁹⁾。

4. 非再呼吸リザーバーマスク (non-rebreathing reservoir mask) (図5)

救急処置などに際して直ちに高い吸入酸素濃度が要求される場合に適応される。15L/分の酸素流量で60～90%の吸入酸素濃度が達成できる。5L/分以下の流量での使用は単純顔マスクと同様にⅡ型呼吸不全には

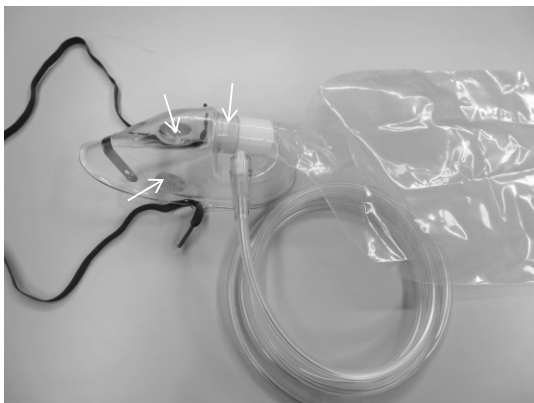


図5 非再呼吸式リザーバーマスク
一方弁(図中→)が3つ付くために「非再呼吸」とされるが、十分な酸素流量とマスクの顔面への密着が条件となる。



図6 開放型マスク

相応しくない。

非再呼吸とはマスクのガスの出入り口に一方弁が付いていることを意味するが、マスクフィットが悪いと一方弁は機能せず、15L/分の酸素流量では一方弁のない再呼吸リザーバーマスクや単純顔マスクと大差がなくなる。

5. 開放型マスク (ディフューザー付) (図6)

マスク側面が大きく開口した形状でCO₂再呼吸を少なくしている。一方でリザーバー効果が少なくなる欠点をディフューザーが作り出す流速の速いガス流で吸入酸素濃度を高く維持する機能を有する。主にⅡ型呼吸不全に適応がある。

6. 気切マスク (tracheostomy mask) (図7)

気管切開されている患者の頸部にフィットしやすい形状と可動域のある接続ポートを有する。自発呼吸下の気切患者に適応があり、気切チューブが存在しても使用できる。高濃度酸素が加湿なしで気切マスクから気管に直接吸気されると、気道分泌物が乾燥し、排出障害のみならず、気管切開チューブの閉塞をきたす危険性があるので、加湿は不可欠である。

7. 高流量デバイス：ベンチュリーマスク (venturi mask)・高流量ネブライザーマスク

上記の両者はともにベルヌーイの定理(ベンチュリー効果)を利用して、一定の酸素濃度のガスを投与できる特徴を有する。すなわち、酸素流量を変化させても患者に投与するガスの酸素濃度は変化しない。原理は①100%酸素のジェットによるベンチュリー効果で大気を引き込んで純酸素を希釈して設定の酸素濃度に



図7 気切マスク

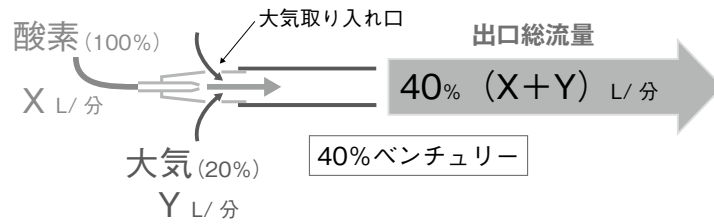


図8 高流量マスクの原理

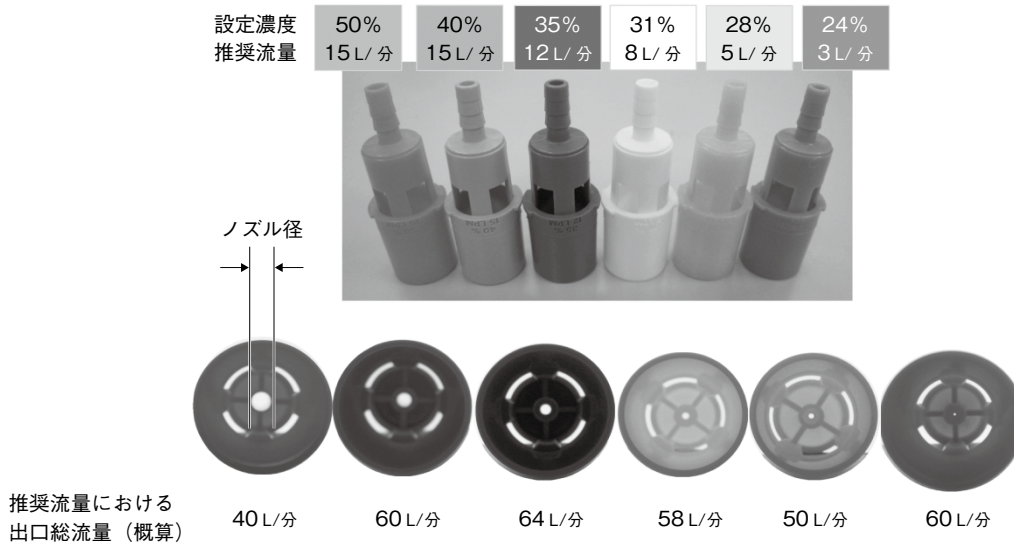


図9 ベンチュリーマスクの酸素ノズル

すると同時に、②大気でガスを増加させて高流量を生み出すことにある (図8)。

40%酸素濃度設定のベンチュリーマスクで考えてみる。酸素流量 15L/分とした場合、図8では X=15L/分である。大気の酸素濃度を 20%として概算すると出口総流量は以下になる。

①ベンチュリーに入るガス総流量=②出口総流量なので

$$(100\% \times 15\text{L/分}) + (20\% \times Y\text{L/分}) \dots\dots ①$$

$$= 40\% \times (15\text{L/分} + Y\text{L/分}) \dots\dots ②$$

$$\therefore Y = 45\text{L/分}$$

$$\text{出口総流量} = 15\text{L/分} + 45\text{L/分} = 60\text{L/分}$$

1) ベンチュリーマスク

ベンチュリーはジェットを作るノズルの径が設定酸素濃度ごとに異なる。低い酸素濃度設定ノズルでは径が小さく、ジェット気流の流速が速いためにベンチュリー効果が大きくなり、大気の吸込み量は多い。逆に高い酸素濃度設定のノズル径は大きく、大気吸込み量

が少なくなるように設定される (図9)。各ノズルで推奨される酸素流量は異なるが、出口総流量は 40～60L/分の高流量が確保される。

より大きな出口総流量を求めて、推奨流量を超えて酸素流量を上げる場面が散見される。確かに酸素流量を上げると出口総流量も増える場合もあるが、必ずしも増える訳ではないので注意する必要がある。とくに酸素ノズル径の小さい酸素濃度設定 30%未満のベンチュリーマスクでは、酸素ノズルの流量抵抗が大きくなり、その結果として流量制限が発生する (図10)。ただし、流量制限によって出口総流量が減っても、減じた流量でベンチュリー効果が発揮されるために出口の酸素濃度は設定通りに維持される。

問題となるのはダイヤル式酸素流量計を使用している場合である。ダイヤル式流量計の設定値を正しい流量であると信じ込むと流量制限に全く気付くことができない。図10に示すようにダイヤル式流量計が低圧型であっても高圧型であっても、程度の差があるものの推奨流量以上では出口総流量は増えず、酸素ラインだけが過剰圧で吹き飛ばすことになる。

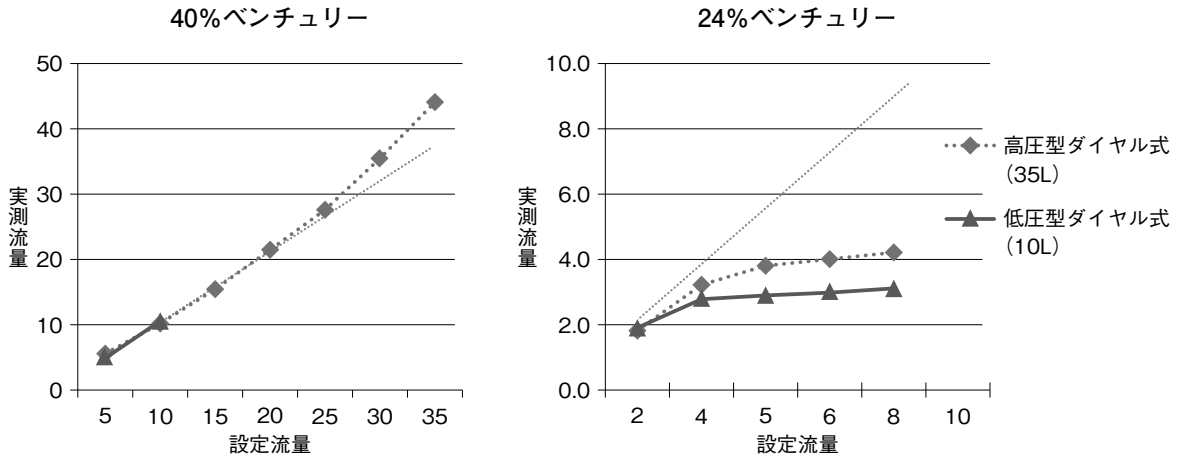


図10 ベンチュリーマスク：酸素ノズルの流量設定と実測流量（40%と24%）

各酸素ノズルのみの酸素流量を測定し、ダイヤル式流量計の設定流量と実測流量を比較した。40%酸素ノズルでは内径が大きいため30L/分以上でも流量制限を受けることはなかったが、24%酸素ノズルでは内径が小さいために推奨流量（3L/分）付近からすでに流量制限を受けた。

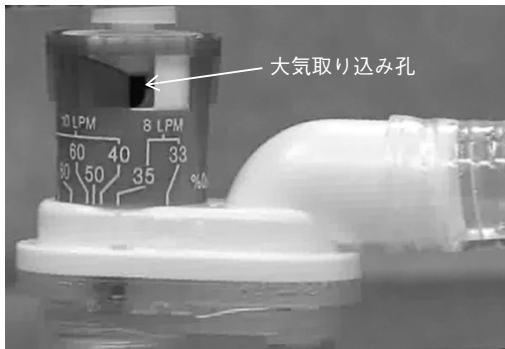


図11 高流量ネブライザーマスクの大気取り込み孔

酸素濃度の設定ダイヤルに設定酸素濃度が打刻され、推奨流量が小さく記載される。

これに対しフロート型流量計では浮子が上昇しないことで流量制限を確認できる点で安全である。ベンチュリーマスクに限らず、末梢に流量抵抗が存在するデバイスや延長された酸素ラインなどでは流量制限を受けやすい。このような場合には恒圧型のフロート式流量計を使用すべきである。

2) 高流量ネブライザーマスク

高流量ネブライザーマスクは単一径の酸素ノズル1本で構成される。ベンチュリーマスクが内径の異なる複数の酸素ノズルを採用して酸素濃度設定するのに対して、高流量ネブライザーマスクは大気を取り込み孔の面積を変えさせることで酸素濃度調節が行われる（図11）。つまり、孔を大きくすれば大気を取り込みが増えて混合気の酸素濃度は低下し、同時に出口総流量も増える。逆に大気を取り込み孔を小さくすれば混合気の

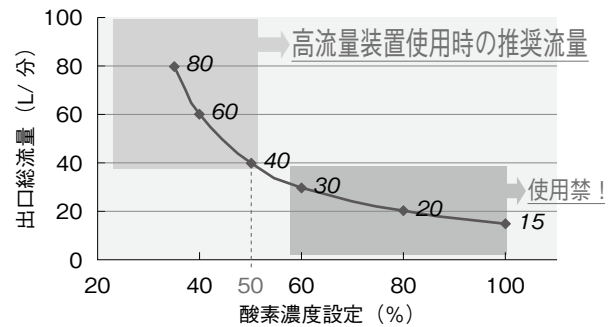


図12 高流量ネブライザーマスクにおける適切な酸素濃度設定

酸素流量設定15L/分として概算上の出口総流量をグラフ上にプロットしたグラフからも、40L/分以上の出口総流量を得るには酸素濃度設定は50%以下となる。この概念に基づいてベンチュリーマスクの酸素濃度設定は50%までしかない。

酸素濃度は高くなるが、出口総流量は少なくなる。

ところで、高流量ネブライザーマスクの酸素濃度設定を100%で使用する事は推奨できない。吸入酸素濃度も100%であると誤解されている場面が今も散見されるので注意喚起をする。

大気取り込み孔を完全に閉じると出口酸素濃度は当然100%酸素になるが、酸素流量計に示される流量しか流れず、単に低流量のネブライザー装置になってしまう。

先述（図1）したように安静自発吸気の流量である30～50L/分を凌駕できる高流量ガスの発生装置として正しく使用することができなくなる。高流量を発生

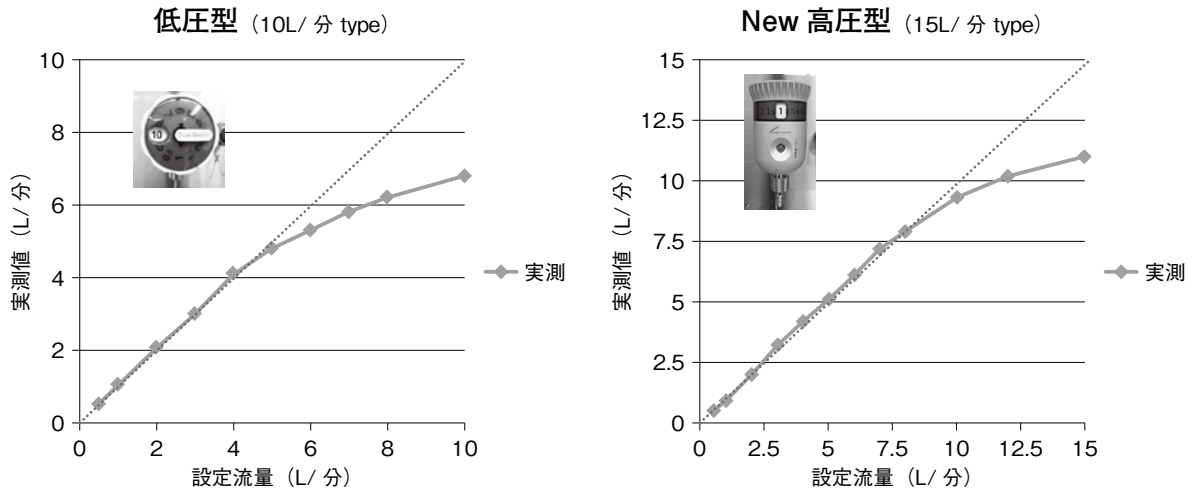


図 13 高流量ネブライザーマスクの流量制限 (ダイヤル式酸素流量計)

当院が採用するデバイスでは、低圧型では5L/分以上の流量設定で流量制限が起きるが、高圧型ダイヤル式酸素流量計でも10L/分以上の流量設定で流量制限を受ける。

させることを前提とするならば、酸素濃度設定50%以下の濃度で使用すべきである。言い換えると酸素流量10～15L/分を採用し、出口総流量を30～40L/分以上にするには、酸素濃度設定50%以下で使用する必要がある(図12)。しかし、この種のデバイスの酸素濃度設定には50%以下だけでなく、60～100%までの設定目盛も刻印されるために、100%設定にすれば高流量で100%酸素を発生させることができるという誤解を初心者が抱く原因になっている。もし、酸素濃度100%で高流量ガスが真に必要なならば、HFNCを採用すべきと考える。

3) 高流量ネブライザーマスクの盲点

さらに高流量ネブライザーマスクは細い単一径の酸素ノズルしかなく、ベンチュリーマスクよりも流量制限を受けやすいという欠点がある。大気取り込み孔を完全に閉鎖して測定した実測流量とダイヤル式酸素流量計の設定流量の関係を示す(図13)。

当院が採用する高流量ネブライザーマスクでは、ダイヤル式低圧型では5L/分以上の流量設定で流量制限が起き、ダイヤル式高圧型酸素流量計でも10L/分以上の流量設定で流量制限を受ける。ダイヤル式流量計を高流量ネブライザーマスクに使用することは推奨できないが、5L以下なら低圧型でも比較的正確に使用できる可能性がある。逆にダイヤル式高圧型の酸素流量計ならば正確な流量が得られるかという点、10L/分を超える流量では期待される流量が流れていないと考えるべきである。



図 14 マスク側孔形状の違い：高流量デバイス用マスク(左)と単純顔マスク(右)

高流量デバイスのマスクでは側孔が大きく、ガスの流れの抵抗とならない形状をしている。

ただし、正確に使用することが最終的な目的ではなく、患者のSpO₂が目標範囲(target range)にあることが重要であり、正確性に固執しすぎる必要はないと考える。実際に酸素のジェットノズル孔径の精度にも比較的大きなばらつきがあるといわれる。

8. ベンチュリー効果を利用する高流量デバイスとマスク抵抗

ベンチュリーマスクおよび高流量ネブライザーマスクには大気を取り込み孔があり、開放型回路で構成されている。このために大気取り込み孔から患者までの回路に抵抗があると、大気を取り込みが少なくなり、その結果、出口の酸素濃度が上昇し、ガス流量が減少する。このことは高流量デバイスのマスク部分の側孔の形状にも表現されている。すなわち、高流量タイプのデバイスのマスク側孔は大きく、ガスの排出が妨げられないようになっている(図14左)。

一方、単純顔マスクの側孔は小さく、リザーバー効果が損なわれない程度の小孔が設けられる(図14右)。実際に高流量用マスクがない場合に、単純顔マスクを流用するとガスの排出が滞って回路抵抗が発生し、大気を取り込み量が減少して、設定酸素濃度より高い酸素濃度のガスが患者に供給されることになる。見かけ上、酸素化が改善したように誤解される原因となるので、単純顔マスクの流用やマスク側孔の閉鎖を行ってはならない。

IX. さ い ご に

吸入酸素療法を実施するためのインターフェイスについて言及したが、そのなかで特に注意していただきたい点は、ダイヤル式酸素流量計に適したインターフェイスと適正な酸素流量での使用である。

近年多くの医療機関で低圧型のダイヤル式酸素流量計が汎用されるが、流量抵抗が存在すると設定値どおりの流量が得られていないことがあまり周知されていない。このために流量低下に気付かず、不適切なインターフェイス使用を余儀なくされている。流量抵抗は高流量デバイスだけの問題ではない。たとえば、鼻カニューラでHOTを行う患者の活動範囲を広げるために酸素ラインを延長することでも流量抵抗が増して、不十分な酸素流量しか投与できなくなる。HOT使用中にSpO₂の低下をきたしても、労作時低酸素血症と誤診される結果になるので注意されたい。もし流量抵抗を疑う場合にはフロート型酸素流量計(恒圧型)と比較し

てガス流の違いを確認すべきである。

COIに関し、著者はメディカ出版および尾崎塾のそれぞれから50万円超の原稿料・講演料と、秋田県産業振興財団から100万円超の奨学寄付金収入がある。

参 考 文 献

- 1) O'Driscoll BR, Howard LS, Earis J, et al : BTS guideline for oxygen use in adults in healthcare and emergency settings. *Thorax*. 2017 ; 72 : i11-90.
- 2) 小野寺 悠, 柴田純平, 板垣大雅ほか : 特集 高流量療法 / ハイフローセラピー. *人工呼吸*. 2017 ; 34 : 3-35.
- 3) 英国胸部疾患学会酸素療法ガイドライン 成人患者における緊急時の酸素療法について (実施要綱・重要勧告事項サマリー). 2008.
<http://www.kobe-century-mh.or.jp/pdf/bts-guideline.pdf>
- 4) ATS Official Statement : Standards for the diagnosis and care of patient with chronic obstructive pulmonary disease. *Am J. Respir Crit Care Med*. 1995 ; 152 : S77-121.
- 5) 宮本顕二 : 経鼻的酸素投与時に加湿は必要か. *救急医学*. 2006 ; 30 : 826-30.
- 6) Jensen AG, Johnson A, Sandstedt S : Rebreathing during oxygen treatment with face mask. The effect of oxygen flow rates on ventilation. *Acta Anaesthesiol Scand*. 1991 ; 35 : 289-92.
- 7) 陳 和夫 : 呼吸療法と睡眠呼吸障害. *人工呼吸*. 2017 ; 34 : 36-44.
- 8) Zevola DR, Maier CB : Use of nasal cannula versus face mask after extubation in patients after cardiothoracic surgery. *Crit Care Nurse*. 2001 ; 21 : 47-53.
- 9) Stausholm K, Rosenberg-Adamsen S, Skriver M, et al : Comparison of three devices for oxygen administration in the late postoperative period. *Br J Anaesth*. 1995 ; 74 : 607-9.