



## Low-flow, minimal-flow and metabolic-flow anaesthesia 再呼吸システムで使用する臨床技術

Christian Hönemann  
Bert Mierke

翻訳監修：東邦大学医療センター大森病院  
麻酔科 准教授 佐藤 暢一 先生

**重要注意事項:**

医療の専門知識は、研究と臨床経験により絶え間なく変化し続けています。本書の著者は、本書の中の物の見方、意見や仮定、特にアプリケーションや効果に関するものは、現在の知識に合致するものとなるよう意図されています。しかしながら、読者のみなさんが臨床的な手順を行う際に、ご自分の責任でこれを行っていただく義務を免除するものではありません。この出版物に登場する登録名、登録商標などの使用は、それに関連する特別な声明がない場合にも、これら名称が適用される保護法や規制から免除されることを意味しません。本書のすべての権利、特に複製およびコピーする権利は、Drägerwerk AG & Co. KGaA が保持するものです。本書のいずれの部分も、Drägerwerk AG & Co. KGaA の書面による承認なしに、複製、機械的に保存、電子的に保存、または画像として保存することはできません。

Fabius®, Primus®, Zeus® および Perseus® は Dräger の登録商標です。

本冊子内に掲載している全身麻酔器 Zeus は、臨床の手順を参考掲載する目的で紹介しており、日本国内での販売はしていません。

**著者**



Christian Hönemann  
PhD, MD

Vice Medical Director  
Chief physician in the collegiate system of  
the department of Anaesthesia and Operative  
Intensive Care, St. Marienhospital Vechta  
Catholic Clinics Oldenburger Münsterland,  
Marienstraße 6-8, 49377 Vechta, Germany



Bert Mierke  
PhD, MD

Medical Director  
Chief physician of the Clinic for  
Anesthesiology and Intensive Care  
St. Elisabeth GmbH, Lindenstraße 3-7,  
49401 Damme, Germany

Low-flow, minimal-flow and  
metabolic-flow anaesthesia  
再呼吸システムで使用する臨床技術

## 謝辞: 偉大な先駆者へ

Jan A. Baum 教授 (2009年9月13日没) は、確実に20年以上時代に先駆けていました。純酸素をキャリアガスとして使用する麻酔管理が言及されるようになるずっと以前から、ましてや術中の感染症を防止する手段として高用量の圧縮酸素について誰も話題に出していなかった頃から、Baum 教授はキャリアガスとしての酸素の役割を重要視していました。同僚であった van Aken 教授と Bohrmann 教授との共著の記事で、教授は2001年から2004年の間にすでに、これを標準として確立しています。

Baum 教授は、低流量・極低流量麻酔の真のパイオニアのひとりと言って間違いありません。教授はまた、純酸素をキャリアガスに使用する代謝流量麻酔(metabolic-flow anaesthesia)についても言及しました。これを行うことにより、教授は極低流量麻酔を単純化し、完成させたのです。

その莫大な量から、公開されている Baum 教授の全資料を考慮することは困難です。但し、Jan A. Baum 教授がその傑出した事前の作業を行っていなかったならば、この本を世に出すことは不可能だったでしょう。したがって、同教授にこの作品を捧げたいと思います。

さらに、Damme での研究中の同教授の優れた指導と訓練に対して、私たちは心からの感謝の意を表します。

また、本著執筆の際にお世話になった Drägerwerk AG & Co. KGaA 社の Sven Olaf Maack 氏の卓越した助力にも感謝いたします。

Priv. Doz. Dr. med. Christian Hönemann

Dr. med. Bert Mierke

## インデックス

---

01 序論/用語の定義	1.1 低流量麻酔	07
	1.2 再呼吸システム	11
	1.3 麻酔システム間の識別	13
02 低流量麻酔のメリット	2.1 臨床的なメリット—加湿、加温、肺機能	20
	2.2 環境的なメリット	24
	2.3 コスト節約—経済的なメリット	24
	2.4 揮発性麻酔薬による汚染の軽減	27
03 低流量・極低流量麻酔の条件	3.1 酸素消費	30
	3.2 麻酔ガス摂取量	31
	3.3 亜酸化窒素摂取量	36
	3.4 MAC 値によるコントロール	37
	3.5 フレッシュガスフロー減少の影響	44
	3.6 モニタリング	48
04 極低流量麻酔の実施	4.1 酸素/空気をキャリアガスとして使用した 極低流量麻酔	52
	4.1.1 実際のヒント	54
	4.1.2 酸素/空気の使用についての議論	55
	4.2 キャリアガスとして酸素を使う極低流量麻酔	58
	4.2.1 実際のヒント	60
	4.2.2 純酸素の使用についての議論	62
	4.3 酸素/亜酸化窒素をキャリアガスとする極低流量麻酔	68
	4.3.1 実用的なヒント	70
	4.3.2 考察	73

05	麻酔器の技術的な要件	5.1 麻酔器の技術的な要件	78
		5.2 麻酔ガスに応じた気化器最大出力	79
		5.3 回路システム容量と時定数	83
06	低流量麻酔の禁忌	6.1 低流量麻酔の禁忌	86
07	確立と概要	7.1 低流量麻酔の確立	90
		7.2 将来の見込み—低流量麻酔	91
08	参考文献	8.1 参考文献	94
		8.2 図の一覧	98
		8.3 キーワードの索引	101
		8.4 カラーコード	103

## 01

低・極低流量麻酔の様々なオプションは、再呼吸システムを使用するために十分な臨床的な技術を示しています。低流量麻酔が実施されるときこそ、再呼吸システムのアドバンテージが実現されます。したがって、再呼吸システムを利用した吸入麻酔が用いられる日々の臨床において、フレッシュガスフローは常に低流量であることが推奨されます。これは、余剰な麻酔ガス排出を最小に抑え、より良い呼吸ガスの状態に到達するための唯一の方法です。

### 1.1 低流量麻酔

低流量・極低量麻酔は、フレッシュガスフロー (L/min) が特徴です。フレッシュガスフローの決定的な要素は、患者の分時換気量より明らかに低いことです。より低いフレッシュガスフローが設定されていると、患者呼気内の麻酔ガスは  $\text{CO}_2$  が化学的に吸着された後、閉鎖式または半閉鎖式呼吸システム経由で患者に戻ります。これが、「再呼吸システム」の名前の由来です。このプロセスの結果、フレッシュガスフローの減少に伴って再呼吸量は連続的に増加し、余剰なガスの量は連続的に減少します。

麻酔の特徴の前に、以下の特徴的な定義が低流量・極低流量麻酔に用いられません。

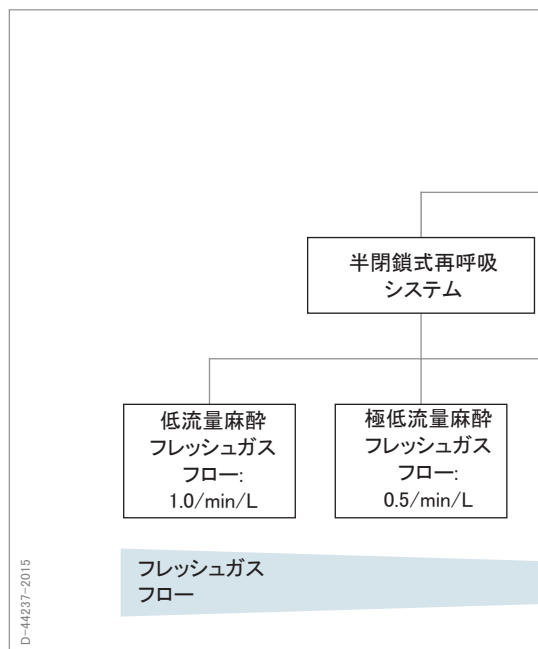
- 1) 低流量麻酔では、フレッシュガスフローを 1.0 L/min まで減少します。この方法は、Foldes らにより、1952 年に最初に記述されました<sup>1,2</sup>。
- 2) Virtue により、1974 年に最初に記述された最小流量麻酔では、フレッシュガスフローは 0.5 L/min まで減少させます。

システムに全くリークがないことを前提に、フレッシュガスフローは、患者が麻酔下で吸収・代謝するガス量まで連続して減少させることができます

閉鎖式システムでは、非定量的麻酔と定量的麻酔は区別されます。

非定量的麻酔では、麻酔医がフレッシュガスフローを調整し、回路システム内で一定の量を維持、呼吸システムの充填および呼吸パターンが変わらないようにします。

それとは対照的に、閉鎖式システムで定量的麻酔を行う場合、麻酔器は麻酔科医の指示に従って、ガス供給だけでなく、呼吸パターン、内部の圧力を一定に維持するだけでなく、キャリアガス及び揮発性麻酔薬について、新鮮ガスの組成(必要であれば亜酸化窒素を含む)を維持します。したがって、供給される全ガス量は、常に患者の実際のガス摂取量と等しくなります<sup>4,5</sup>。このタイプの定量的麻酔は、ドレーゲル社の Zeus IE 麻酔器を使用して行うことができます。





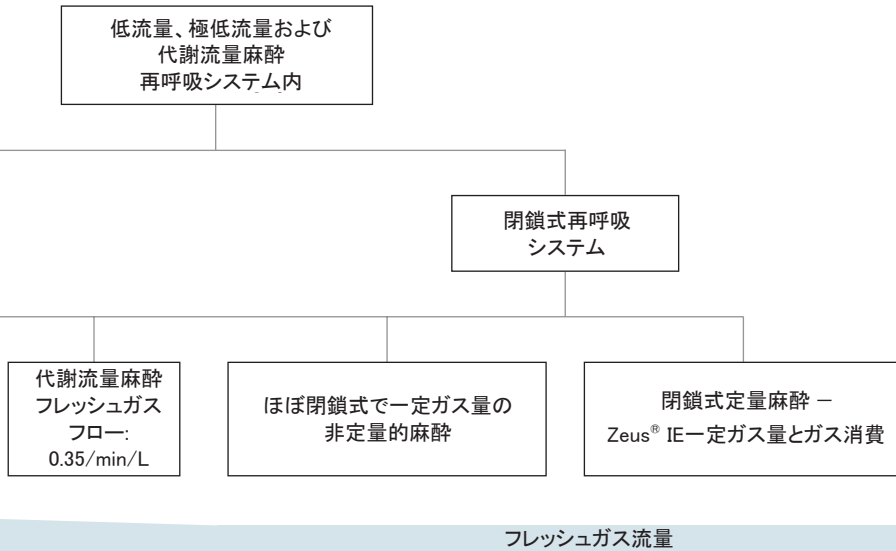
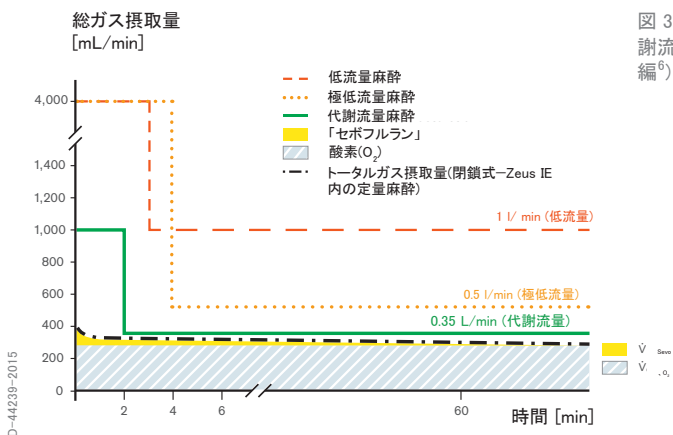
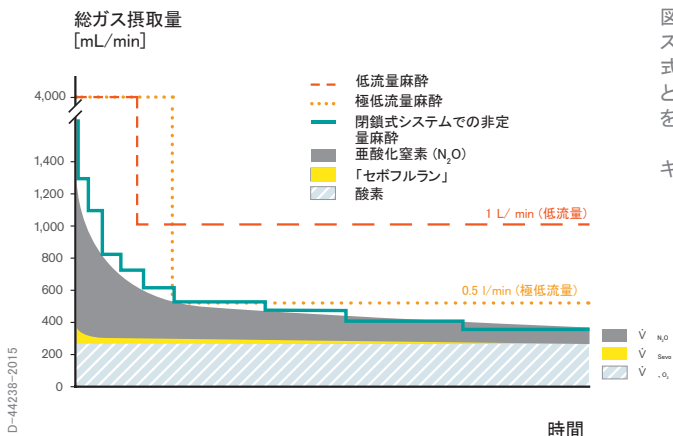


図 1: 再呼吸システムの低流量、極低流量、代謝流量麻酔 (Baum JA を改編<sup>6)</sup>)



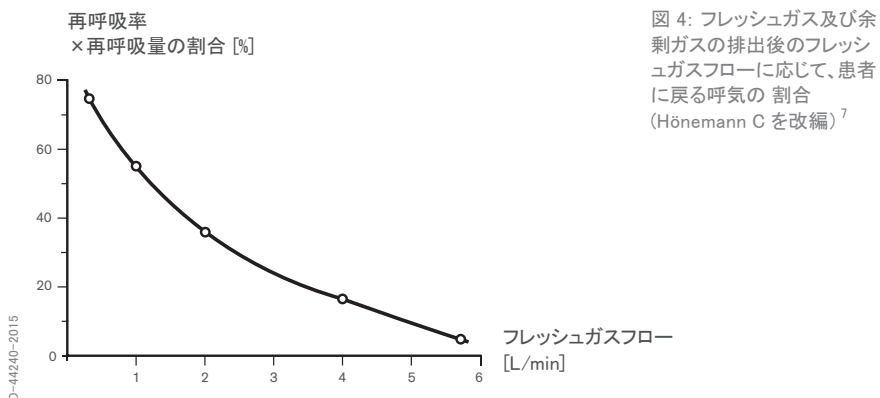
## 1.2 再呼吸システム

前述のように、低流量を用いての麻酔実施の際の要件は、再呼吸装置を使用することです。このシステムでは、患者の呼気に含まれる未使用のガスと麻酔ガスは、吸気ガスに再利用されます。

現在利用されている再呼吸システムは、従来の回路システムに対応します（たとえば、ドレーゲル製品ファミリーでは Fabius<sup>®</sup>、Primus<sup>®</sup>/Primus<sup>®</sup> Infinity<sup>®</sup> Empowered (IE)、Zeus<sup>®</sup>/Zeus<sup>®</sup> Infinity<sup>®</sup> Empowered (IE)、や Perseus<sup>®</sup> A500)。これらのシステムの特徴は、炭酸ガス吸収装置です：呼吸回路システムから、呼気中の二酸化炭素を化学的に除去・吸着します。除去中に、熱（ $\Delta T$ ）と湿度（ $H_2O$ ）も発生しますので、回路システム内の呼吸ガスの状態を改善します。CO<sub>2</sub> を吸収するためには、ソーダライムを使用しています。今日では、これは主に水酸化カルシウム（Ca(OH)<sub>2</sub>）から成ります。

吸収反応は発熱性であり、炭酸カルシウム、最終生成物として水および熱が生成されます：





システムからのガスの連続損失は、酸素消費と組織による麻酔ガスの濃縮(およびシステムリークの可能性もあり)の結果であり、これは呼吸システムに新たなガスを導入することによって補償されます。

吸収装置は呼吸ガスのコンディションを整えるために吸気側に挿入する必要があります。そうすることで呼気ガスの再呼吸分が、そこを通過します。熱と水が化学反応の結果放出されるため、吸収装置は吸入される呼吸ガス<sup>8</sup>の状態を整えるのを助けます。

### 1.3 麻酔システム間の識別

呼吸システムを技術的に識別するために、「開放」、「半開放」、「半閉鎖」、「閉鎖」といった用語を使用しています。しかしながら、これら用語は既に麻酔システムを分類するには不適切なものになっています: これらは、再呼吸の有無によって再分類することが適切であるように思われます<sup>9</sup>。フレッシュガスフローにより、再呼吸システムは半開放式、半閉鎖式または閉鎖式となります。再呼吸の量は、フレッシュガスフローの量によって決まります。

フレッシュガスフローが低くなるほど、再呼吸量が高くなり、余剰ガスの割合が小さくなります。

#### 半開放式

部分的に再呼吸システムを取り入れた、半開放式が使用されます。05.17フレッシュガスフローは、次の呼吸の前に呼気量が消失しているよう、分時換気量のおよそ2~3倍でなければなりません。これは、6 L/minを越えるフレッシュガスフローを設定することに当たります。

#### 半閉鎖式システム

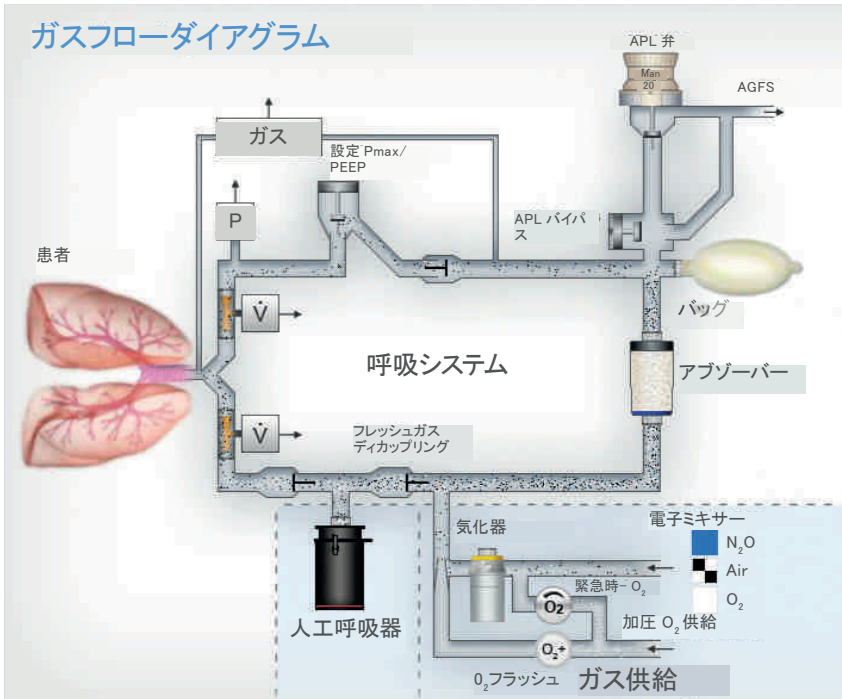
半閉鎖式システムでは、患者は呼気の一部を再呼吸し、再循環されない混合ガスは、余剰ガスとしてシステムから排出されます。大半は患者に戻されます。その結果、機能的な回路システムとなります。

麻酔システムに供給されるフレッシュガス量は、患者のガス摂取量よりも高くなり、同時に分時換気量よりも低くなります。再循環するガス量はフレッシュガスフローに反比例し、余剰なガス量に正比例します。

再呼吸の部分が增えるに従って、回路内ガスの組成とフレッシュガスの組成の差が広がります。

半閉鎖式麻酔システムでは、フレッシュガスフローは 0.5 から 6 L/min の間となります。

### ガスフローダイアグラム



D-44241-2015

図 5: 例として、Primus/Primus IE 再呼吸システムを用いたガスフローダイアグラム

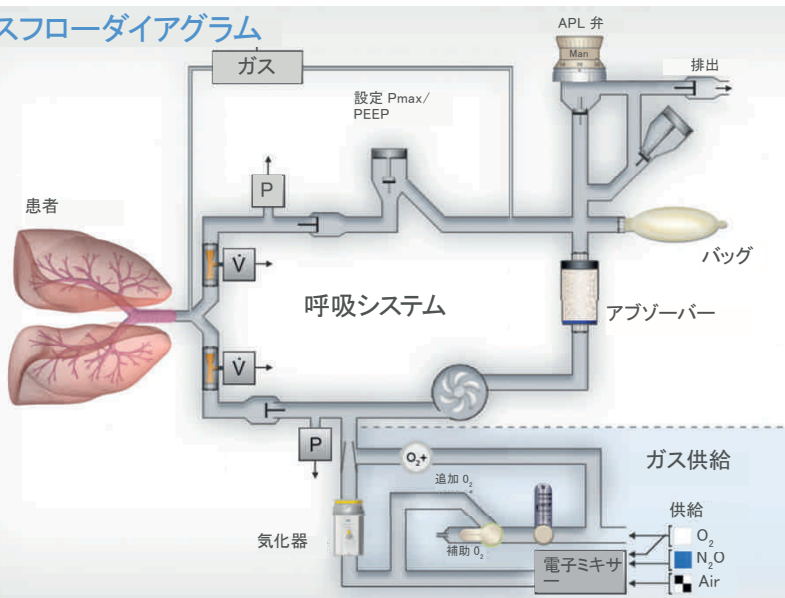
#### ほぼ閉鎖式での非定量的麻酔

閉鎖式の麻酔システムは、CO<sub>2</sub>をアブゾーバーにより除去した後、全ての呼気ガスを患者に送り返します。このようにして、回路システム内のフレッシュガスフローは十分に減少されるため、代謝または拡散されただけのガス量が交換されます。余剰ガスがシステムから排出されることはなくなります。これは、閉鎖式な再呼吸システム（非定量麻酔）に該当します。閉鎖式の非定量麻酔は、ほとんどの麻酔器で行うことができます。

以下の条件に適合すれば充分です: 呼吸システムは十分にタイトであること（リークがないこと）。麻酔器は、最小のフレッシュガスフローの設定を行えるものであること。麻酔ガスの投与は低流量の範囲にあっても十分に正確なものであること。また、モニターが麻酔ガス組成の包括的なモニタリングを保証するものであること（セクション3.6 モニタリング、p. 48も併せてご覧ください）。

フレッシュガス量と消費/摂取量の間の一時的な不均衡は、例えばリークなどのような場合、換気バッグのようなガスリザーバーを使って補償することができます。これは、再呼吸システムを持つドレーゲル社の全機械にて導入されています（ドレーゲル製品シリーズ、Fabius、Primus/Primus IE、Zeus/Zeus IE および Perseus A500）。

### ガスフローダイアグラム



D-44242-2015

図 6: 例として Perseus A500 再呼吸システムを用いたガスフローダイアグラム



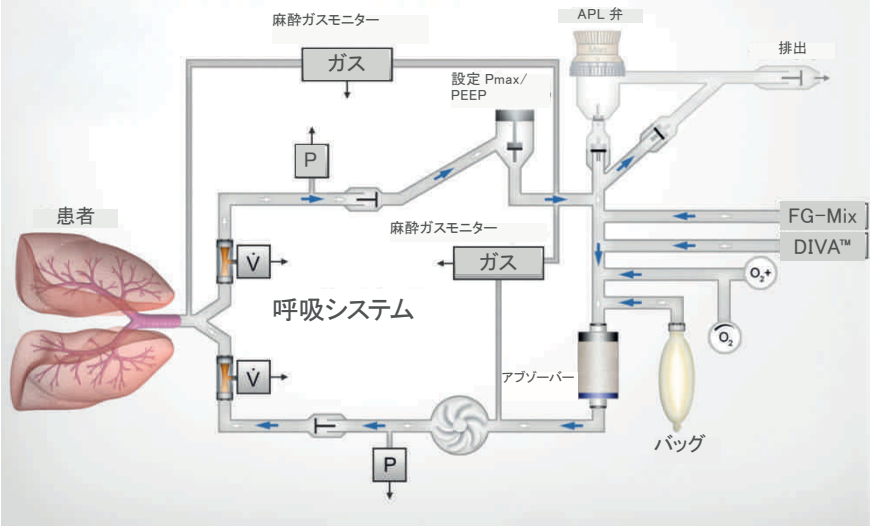
### 閉鎖式回路での定量麻酔

(クローズドループ-自動-制御)

クローズドシステムによる定量麻酔は、クローズドループ フィードバック制御によるガスと麻酔薬の投与の電子制御を必要とします。

今日現在、この投与原理はいくつかの少数の麻酔器のみに搭載されるものです。このタイプの制御システムは、たとえば Zeus/Zeus IE に見られます。

### ガスフローダイアグラム



D-44243-2015

図 7: 例として Zeus/Zeus IE 再呼吸システムを用いたガスフローダイアグラム



## 02 低流量麻酔のメリット

2.1 臨床的なメリット—加温、加湿、肺機能	20
2.2 環境的なメリット	24
2.3 コスト節約—経済的なメリット	24
2.4 揮発性麻酔薬による汚染の軽減	27

## 02 低流量麻酔のメリット

### 2.1 臨床的なメリット—加温、加湿、肺機能

麻酔下の患者用呼吸ガスのコンディショニングの重要性が知られるようになってから、かなりの時間が経過しています<sup>10,11,12</sup>。ICU内の挿管または気管切開した患者に呼吸ガスをコンディションを整える必要性はもはや議論されることなく理解されるようになっていきます。ラリンゲルマスクや気管チューブによって上気道が損傷されると、生理的機能(呼吸ガスの加温と加湿)を完全に防げられます。不適切な呼吸ガスコンディショニングは、毛様体上皮の機能を阻害するリスクと、それによる粘膜せん毛クリアランスの機能を阻害するリスクを伴います。呼吸ガスコンディショニングが不十分な場合、気道上皮への形態的な損害、たとえば、分泌物の逆流、細気管支の障害、粟粒性無気肺を招く結果となる場合があります。

したがって長時間におよぶ麻酔の際にも、麻酔ガス温度 28° C 以上、17 ~ 30 mg H<sub>2</sub>O/L の絶対湿度が供給される必要があります。極低流量麻酔がこれらの要求に応えます: 临床上の使用法は、たとえば、わずか15分後に望ましい絶対湿度が確立され、1~2時間後に、必要な呼吸ガスの温度が達成されます(図 8 をご覧ください)<sup>13,14</sup>。

したがって、15 ~ 30 分の比較的短い手術でも、フレッシュガスフローを極低流量または代謝流量に減少させることを推奨します。

ドイツ、フェヒタの放射線科では、がん治療の際にアフターローディング式HDRブラキセラピーを使用しています。これらの処置は、1~2時間かかり、気管挿管による全身麻酔下で行われています。

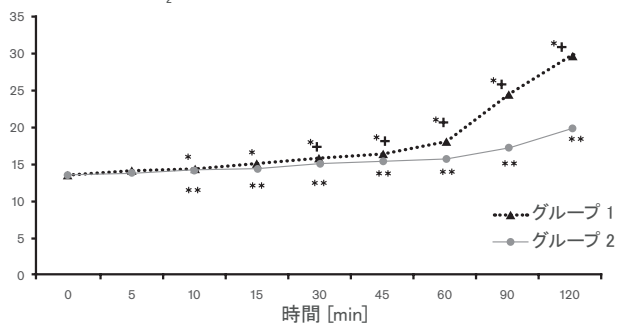
絶対湿度 [mgH<sub>2</sub>O/L]

図 8: 吸気ガスの絶対湿度の比較

グループ 1 フレッシュガス  
フロー 1 L/min (0.5 L/min  
O<sub>2</sub> + 0.5 L/min N<sub>2</sub>O) + デス  
フルラン;  
グループ 2 フレッシュガス  
フロー 3 L/min (1.5 L/min  
O<sub>2</sub> + 1.5 L/min N<sub>2</sub>O) + デ  
スフルラン (Bilgi M らを  
改編<sup>15</sup>)

- \*p < 0.05 気管挿管後 10分, 15分, 30分, 40分, 60分, 90分および120分  
の値を、グループ1の時間 0 と比較  
\*\*p < 0.05 気管挿管後 10分, 15分, 30分, 40分, 60分, 90分および120分  
の値を、グループ2の時間 0 と比較  
+p < 0.05 両グループ間の比較

D-44244-2015

麻酔導入は、プロポフォール(2 mg/kg)、スフェンタニル(0.15 to 0.25 μg/kg)とロクロニウム (0.4 to 0.6mg/kg) を用い、維持は、吸入麻酔で行われています。

異なるフレッシュガスフローを使用する3つのグループを比較しました。2 または 6 L/min のフレッシュガスフローで、麻酔維持を行いました。第3のグループでは、フレッシュガスフロー 1 L/min で吸入麻酔導入後、0.9 MAC に到達したところでフレッシュガスフローを 0.35 L/min まで減少しました。

次の3つの図は、測定パラメータ(呼吸ガス温度、相対・絶対呼吸ガス湿度)を示したものです。これらは、麻酔器のYピースの吸気側で測定されました。

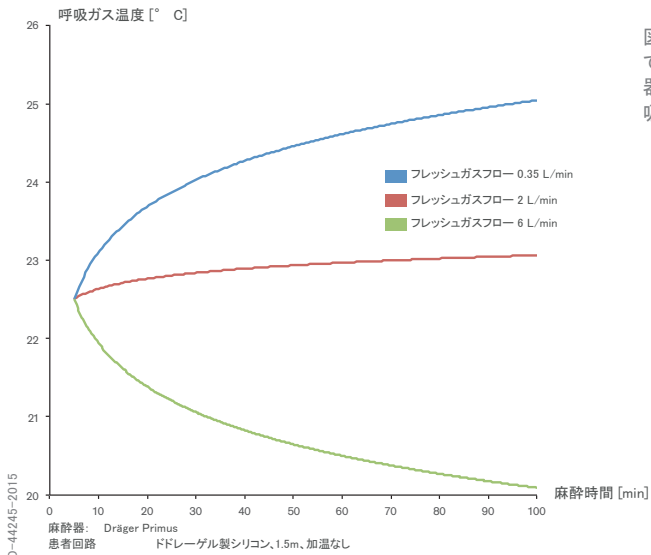


図 9: 麻酔の経過において、ドレーゲルPrimus 麻酔器吸気側のYピースで呼吸ガス温度を測定

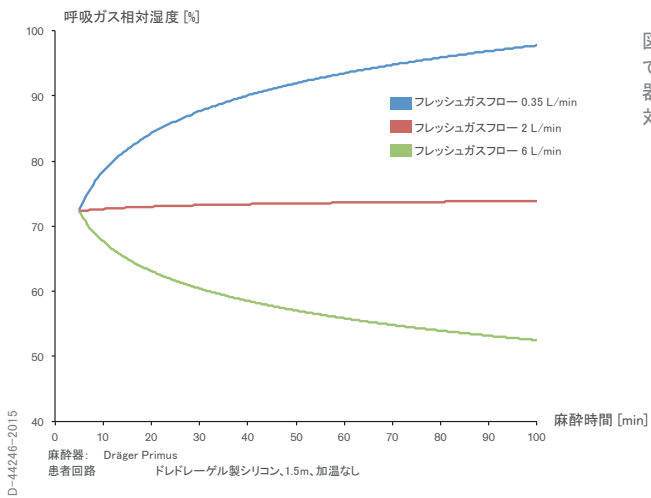
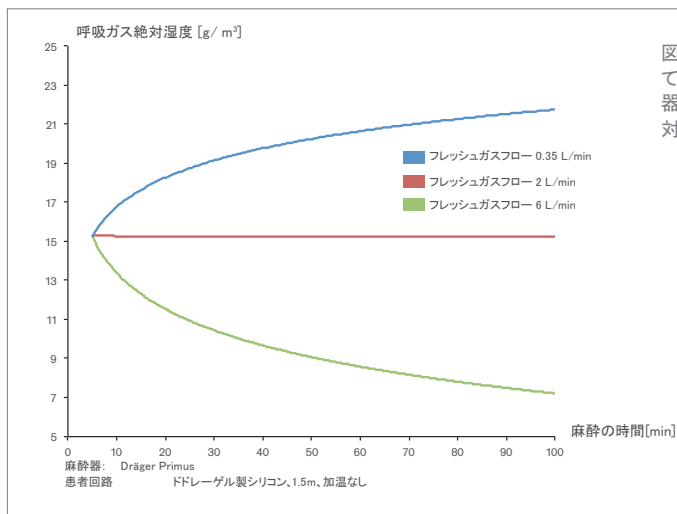
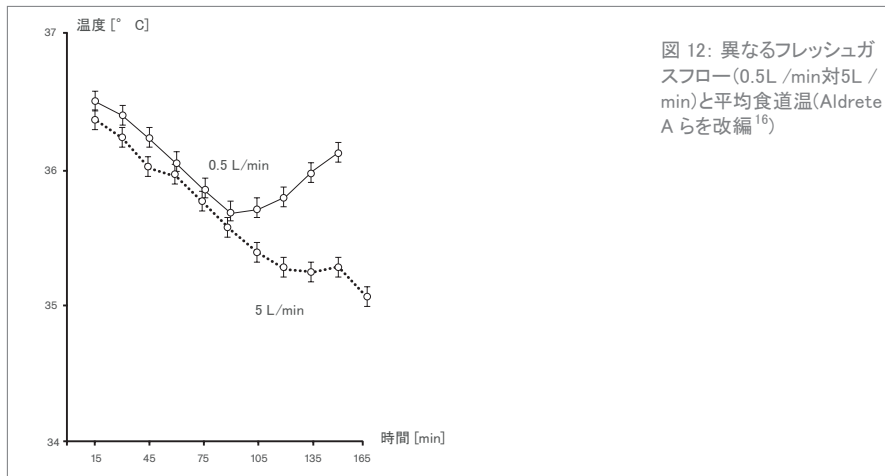


図 10: 麻酔の経過において、ドレーゲルPrimus 麻酔器吸気側の Y ピースで相対湿度を測定



低流量フレッシュガスは、体温を保持する効果もみられます。(図 12 をご覧ください)。



## 2.2 環境的なメリット

高流量の麻酔の特徴に、大量の揮発性麻酔が排出されることがあります。これは、環境を汚染するだけでなく、限られた予算にさらに負担をかけるものとなります。環境への意識や、年々厳しくなる業界の安全基準、コスト意識により、今日、私たちは麻酔に関する臨床手順を再考せざるを得ません。麻酔ガスの排出は最小に抑えられなければならない、未使用の麻酔には再使用されるべきでしょう。低流量・極低流量麻酔なら、これらの要求に応えることができます。

これら明白な利点がありながらも、多くの施設はいまだにこれら手順を頻繁に使用することを躊躇しています。今までと違った方法に適応するためには、考えを改めることが始められなければならない、それに従っていつもの手順も変えなければなりません。しかしながら、この新しい考え方にコミットさえすれば、結果としては環境的・経済のメリットを得ることができ、投資分は相殺されるのです。

## 2.3 コスト節約—経済的なメリット

低流量・極低流量麻酔を使用すると麻酔薬の必要量を減らすことができ、特に温室効果を減らすとともに、亜酸化窒素と酸素も減らすことができます。環境的な効果は、注目すべきコスト節約をもたらすものでもあります。20年以上のデータが 55% ~ 75% のコスト節約を確認していますが、それだけではなく、フレッシュガスフローが 4 L/min から 1 L/min に削減されれば、同様におよそ 60% を潜在的に節約できることが最近のデータで示されています。データは、閉鎖式で一貫して定量麻酔を使用した場合に基づくもので、フレッシュガスフロー、3 L/min を使用する場合と比較した場合です<sup>17,18,19</sup>。極低流量の方法を使用すると、ソーダーライムの消費量は3倍となりますが、関連する経費は利益-コスト分析ではごくわずかな小さいものとなります。

さらに、吸入麻酔の費用が正しく計算されても、追加の静脈注射薬のコスト、資本費用、原価償却、点検、修理経費も考慮に入れなければならない



D-44249-2015

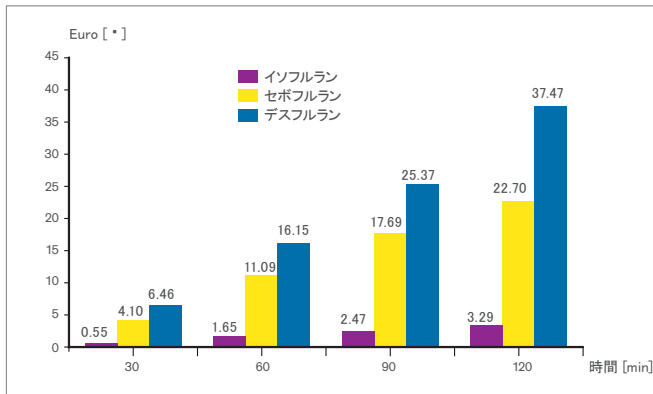


図 13: 0.5 L/minの極低流量麻酔と標準的な0.517フレッシュガスフロー3 L/minとでコスト削減を比較 (単位は ユーロ)

備考 コスト削減を図に示したもの。配達、付加価値税、その他を含む麻酔ガスに関する潜在的な経費に基づいて計算した結果、図13/14の数値が得られました。(平均値、日付: 2013年10月):

イソフルラン 250 mL (Forene, Abbvie) € 32.73  
 セボフルラン 250 mL (Sevorane/Sevoflurane, Abbvie/Baxter) € 131.92  
 デスフルラン 250 mL (Suprane, Baxter) € 81.16

D-44250-2015

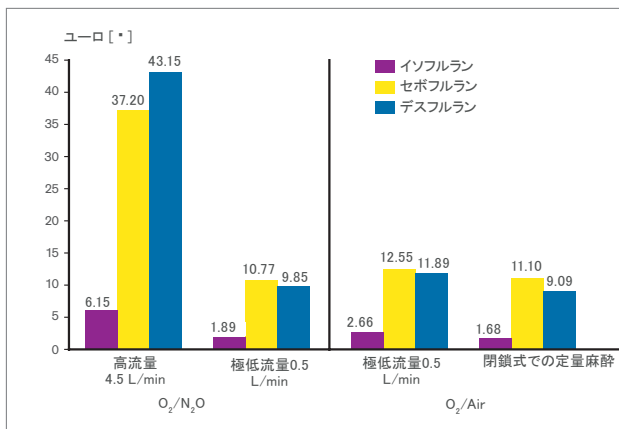


図 14: 2時間の吸入麻酔に基づく吸入麻酔薬のコスト (単位はユーロ)

麻酔薬毎の比較

という批判的なコメントは、常にあります。しかしながら、高流量のフレッシュガスフローを使用する標準的な手順でも、これらコストは生じます。したがって、私たちの意見では、日々の治療で低流量のフレッシュガスフロー麻醉を一貫して使用する明瞭な要求があつてしかるべきだと思われる。この議論に同調して、麻醉器の技術的なレベルが低流量のフレッシュガスフローを可能にしていること、さらに機械のいくつかは実は低流量麻醉技術に向けて設計されているという事実があります。

要約すると、フレッシュガスフローを削減すると、使用される麻醉ガスの効率が上がるということです。閉鎖式の定量麻醉でのみ、酸素（または亜酸化窒素）と揮発性麻醉薬の比率が一時的に最大値 1 となり得ます。

このとき、呼吸システムに同時に供給されるフレッシュガスと麻醉ガスの摂取量の間で、効率は比率と一致します。

$$\text{効率性} = \frac{\text{VU}}{\text{L/min}}$$

VU = 患者摂取量

FGF = フレッシュガスフロー

## 2.4 揮発性麻酔薬による汚染の軽減

現代の吸入麻酔薬は、部分的に置換されるクロロフルオロカーボン (CFC) およびフッ素化炭化水素のグループに属します。これらの大気中でのライフタイムは長いと言えます。それらは、産業的に使用されるCFCの5から13%にあたるオゾン破壊の可能性があります。年間に生産される揮発性麻酔の量は、完全に置換されるCFCのおよそ1%に該当します。しかしながら、麻酔ガスの不要排出量を最大限に削減する要求が再呼吸システムの適切な使用につながることは、議論の余地がありません。

麻酔ガスを最高で90%削減すると、別のメリットも生じます: 麻酔の環境下で働くスタッフの曝露が顕著に減ります<sup>20</sup>。

Virtue らによる研究によると<sup>21</sup>、余剰ガス排出システムがない場合、 $N_2O$ を0.5 L/min (低流量) または 0.2 L/min (最小流量) まで減少させて再呼吸システムで一貫して使用することにより、亜酸化窒素からの現場の曝露を時間加重平均濃度で9または15 ppmまで低減することが示されています。これは、ドイツ産業安全ハンブルグ事務所が設定した50ppmの範囲制限を下回るだけでなく、最も厳格に定められているアメリカ国立職業保安・健康協会 (NIOSH) の推奨基準である、25ppmの最大許容濃度さえ満たすものです。麻酔ガスの消費量を減らして職場の曝露を低く抑えることは、作業の全分野に直接影響を与えます。



## 03 低流量と極低流量麻酔の条件

3.1 酸素消費	30
3.2 麻酔ガス 摂取量	31
3.3 亜酸化窒素 摂取量	36
3.4 MAC 値によるコントロール	37
3.5 フレッシュガスフロー減少の影響	44
3.6 モニタリング	48

## 03 低流量と極低流量麻酔の条件

### 3.1 酸素消費量

気道を生理的により良い状態に調整し、維持すること以外にも、低流量技術の使用は、重要なパラメーターである酸素消費量のモニター、少なくとも推定を可能にします。

麻酔中の患者酸素消費量は代謝消費と一致し、ほぼ一定であることが推測されます。

1945年には、Samuel Brody が、ヒトと動物の両方でエネルギーと酸素消費に関する広範囲にわたる研究を実施しています。

この研究から、彼は公式を導きだし、これは今日でもよく使用されていません<sup>22</sup>。

$$VO_2 = 10 \times KG[kg]^{3/4}$$

$VO_2$  = 酸素の摂取量

$KG[kg]$  = 体重、単位は kg

以後、この公式は数々の著者によりさらに発展され、体表面や身体の各部分、年齢に適用されています。けれども、麻酔患者における酸素消費は 10% ~ 20% 多く見積もられていることはよく知られています。特に体重の重い患者において、これは顕著です。それでも私達は、安全のために、全般的に過大評価した酸素消費量を考慮したうえで Brody の公式を参照しています。

原則としては、mL/min の酸素消費量はおよそ次のようになります：

$$VO_2 = 3.5 \times KG \text{ [mL/min]}$$

VO<sub>2</sub> = 酸素摂取量、単位は mL/min

KG = 体重、単位は kg

たとえば体重 100 kg の患者の場合、これは酸素摂取量が 350 mL/min となるものと考えられます。

## 3.2 麻酔ガスの摂取量

麻酔ガスの摂取量は、使用される揮発性麻酔薬の薬物動態学と薬力学に基づきます。吸入麻酔薬の摂取量は一麻酔システム内のガス組成が一定である場合一麻酔の過程全体を通じて、指数関数的に低下します。Lowe の公式に一致して、それは麻酔薬の期待される濃度と溶解度、および心拍出量に比例します<sup>23,24</sup>。

$$V_{AN} = f \times MAC \times \lambda_{B/G} \times Q \times t^{1/2} \text{ [mL/min]}$$

V<sub>AN</sub> = 吸入麻酔摂取量 (麻酔ガス摂取量)、単位は mL/min

f × MAC = 最小肺胞内濃度 (例えば、0.8 × MAC) の関数として、望ましい呼気麻酔濃度を

λ<sub>B/G</sub> = 血液ガス溶解度係数

Q = 心拍出量 (dL/min)

Bailey<sup>25</sup> の5コンパートメントモデルに基づく予測モデルも、また有用です。これにより、麻酔ガスの人体での分布を計算することが可能となっています。さらに、予測モジュール用の計算モデルは、今では純粋に臓器重量、血流、生理的な分布パターンと溶解度係数に関する実験データに基づき、

麻酔ガスに使われています。これらモデルは、推定されるガスパターンを計算し、すでに消費されたガスを記載します<sup>26,27</sup>。

主要な臨床上の重要な点としては、最大麻酔ガス摂取は、最初の数分で起こります(いわゆる摂取時間とウォッシュインの段階)。麻酔維持の段階では、患者のコンパートメントは飽和していると考えられることから、麻酔ガス摂取量はほぼ安定しています。麻酔の実際の効果を判断する重大な要素は、効果的なコンパートメント—つまり脳の効果部位濃度です。同じくらい重要な点に適切な揮発性麻酔薬剤の選択があり、薬力学と薬物動態学を考慮に入れなければなりません。現在使われているすべての薬剤が、低・極低流量麻酔を実施するのに等しく適しているわけではありません。これは、主には異なる溶解度と関連する麻酔の強度、および薬剤の生理的な摂取量に依存します<sup>28</sup>。

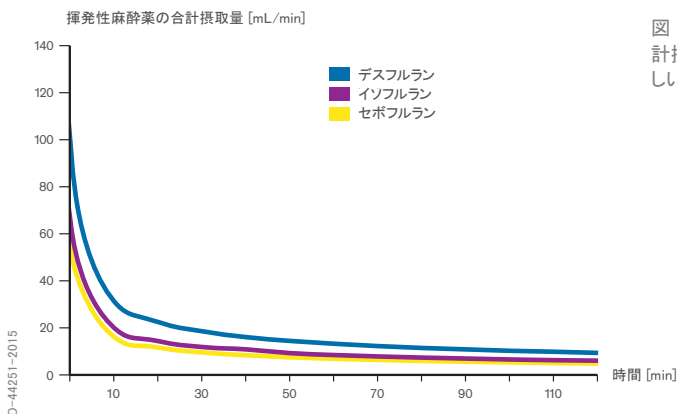


図 15: 揮発性麻酔薬の合計摂取量(呼気濃度—望ましい状態:  $0.9 \times \text{MAC}$ )



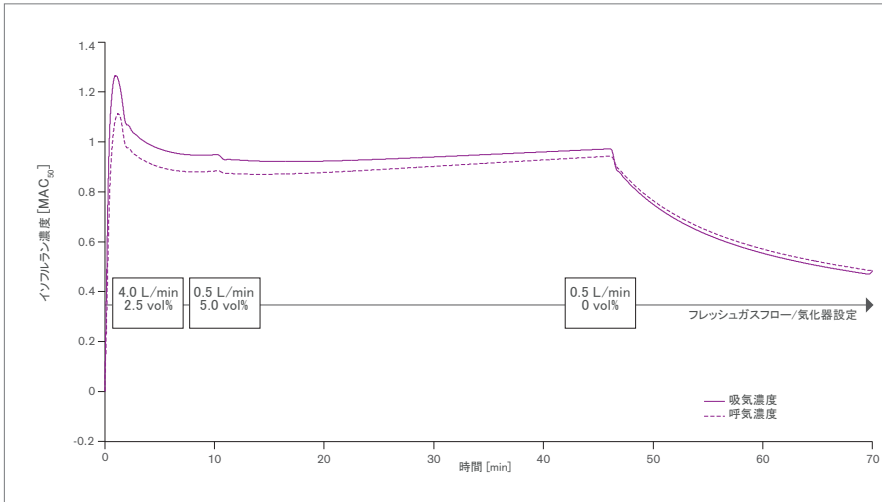


図 16:  $O_2$ /Airをキャリアガスとする、吸入麻酔の過程での吸気と呼気のイソフルラン濃度

Bailey<sup>25</sup>に従った、5コンパートメントモデルに基づく具体的なグラフ

期待値: 呼気濃度 0.9 MAC 気化器の調整のためには、キャリアガスとしての酸素と空気を含む極低流量麻酔手順の図もご覧ください。

4 L/min フレッシュガスフローから開始し、気化器の設定は 2.5 vol%。いったん期待値である 0.9 MAC に達したら、フレッシュガスフローを 0.5 L/min に、気化器設定を 5% に変更します。45 分後、気化器設定を 0 vol% に変更します。フレッシュガスフローは変更しないでください。

麻酔濃度が増減に従って、期待値を維持するよう、各種時定数を使って気化器の設定を調整します。

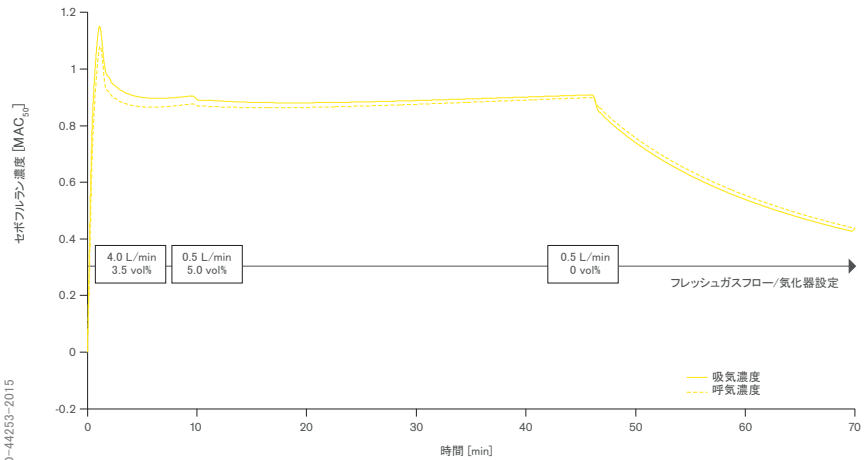


図 17:  $O_2$ /Airをキャリアガスとしたときの、吸入麻酔の過程での吸入と呼気セボフルラン濃度

Bailey<sup>25</sup>に従った、5 コンパートメントモデルに基づく実例的グラフ

期待値: 呼気濃度 0.9 MAC 気化器の設定: 酸素-空気をキャリアガスとする、極低流量麻酔手順のダイアグラムも併せてご覧ください。

4 L/min フレッシュガスフローから開始し、気化器の設定は 3.5 vol%。いったん期待値である 0.9 MAC に達したら、フレッシュガスフローを 0.5 L/min に、気化器設定を 5% に変更します。45 分後、気化器設定を 0 vol% に変更します。フレッシュガスフローは変更しないでください。

麻酔濃度の増減に従って、期待値を維持するよう、各種時定数を使って気化器の設定を調整します。

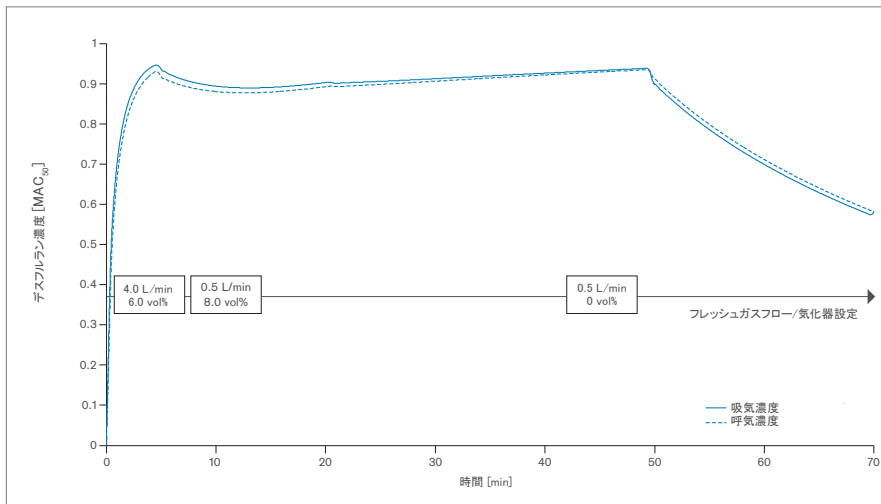


図 18:  $O_2$ /Airをキャリアガスとしたときの、吸入麻酔の過程での吸気と呼気デスフルラン濃度

Bailey<sup>25</sup>に従った、5コンパートメントモデルに基づく実例的グラフ

期待値: 呼気濃度 0.9 MAC 気化器の設定: 酸素-空気をキャリアガスとする、極低流量麻酔手順のダイアグラムも併せてご覧ください。

4 L/min フレッシュガスフローから開始し、気化器の設定は 6 vol%。  
 いったん期待値である 0.9 MAC に達したら、フレッシュガスフローを 0.5 L/min に、気化器設定を 8% に変更します。  
 45 分後、気化器設定を 0 vol% に変更します。フレッシュガスフローは変更しないでください。

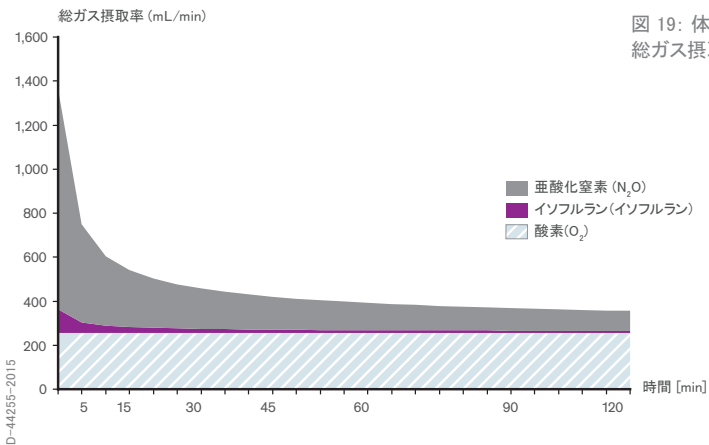
麻酔濃度の増減に従って、期待値を維持するよう、各種時定数を使って気化器の設定を調整します。

### 3.3 亜酸化窒素摂取量

亜酸化窒素は体内で代謝されません。したがって、 $N_2O$  摂取量は、肺胞毛細血管部分の圧力の差によって決定されます。麻酔開始時にはこの差が大きいです。時間の経過につれて組織内のガス飽和が上昇するため、これは低下します。およその亜酸化窒素摂取量は、標準体重の成人の患者の場合、セバリングハウス指数を使って計算可能です<sup>29</sup>。

$$V_{N_2O} = 1.000 \times t^{-1/2}$$

$V_{N_2O}$  = 亜酸化窒素の摂取量  
 $t$  = 麻酔導入後の時間 (min)



### 3.4 MAC 値によるコントロール

揮発性麻酔薬の薬力学的と薬物動態学的作用の間には、はっきりした区別が存在します。重要な要因は、血液ガス分配係数と脂肪への溶解性です。吸気ガスに含まれる麻酔薬は肺胞の壁を通過し、血液中に溶解し、様々な身体区画内に行き渡り、最終的に脳などの目標または効果部位に達します。

吸気麻酔の深さは、脳内の麻酔濃度によって決定されます。これは、血中濃度の機能として、直接肺胞の分圧に依存します。したがって、麻酔深度は呼気ガス内の揮発性麻酔の吸気濃度を変えることにより確立されます。麻酔深度と麻酔薬の脂肪への脂溶性の間には、線形関係があります：麻酔薬が脂肪に溶け混みやすければ溶け混みやすいほど、吸入麻酔剤が強力となり、また定義された麻酔深度を達成するのに必要とされる肺胞の濃度が下がります。

MAC 値は、揮発性麻酔の最小肺胞内濃度であり、この時点で 50% の患者が皮膚切開に対して反応を見せなくなります。麻酔の MAC 値が低ければ低いほど、麻酔薬の強度は強くなります。

MAC 値は、使用されるキャリアガスに依存します<sup>30,31</sup>。  
MAC<sub>50</sub> awakeは、さまざまに定義されています。これは、患者の半数が麻酔後に目を覚ます値です。

したがって、日々の使用においてMAC 値を言及する場合、MAC<sub>50</sub>を指しており、これは該当する使用されるキャリアガスに関連する吸入麻酔のおおよその強度を示すものです。

表 1: 揮発性麻酔薬毎の MAC-, MAC Aware ,MAC Awake (Heller ARを改編)<sup>30)</sup>

麻酔薬の強さ	MAC	MAC AWARE	MAC AWAKE
	(vol% in O <sub>2</sub> )	(MAC の 70%) (vol% in O <sub>2</sub> )	(MAC の 35%) (vol% in O <sub>2</sub> )
Isoflurane	1.15	0.78	0.42
Sevoflurane	2.05	1.43	0.71
Desflurane	5-6	4.2	2.1

#### 40歳の吸入麻酔薬MAC値

##### MAC 値に影響を与える要素

多くの研究は、患者の身長と体重、また麻酔の持続時間のいずれも、MAC 値に影響を与えないとしています。対照的に、中枢神経系に作用する薬物は、MAC 値を下げます。日常的に複数の麻酔薬を使用した麻酔管理ではこの点を考慮しなければなりません。(バランス麻酔、p.39をご覧ください)。したがって、オピオイドや鎮静薬は、MAC 値を減らします。バランス麻酔の原理は、種々の薬剤を組み合わせることによって、個々の麻酔コンポーネントに影響を与えることを含みます。理想的には、これはコンポーネント(鎮静、鎮痛、筋弛緩)を別々に制御することで使用する薬剤投与量を低減し、副作用の発生率を低下させるというメリットがあります。

たとえば、低体温や妊娠では、MAC 値は減少します。対照的に、発熱を伴う高体温、慢性アルコール依存症は、吸入麻酔薬の必要性を増加させるため、MAC 値がより高くなります。

ドレーゲル SmartPilot®View を使用すると、低流量麻酔を有意義にサポートすることができます。

HÖNEMANN C. 著「バランス麻酔」。<sup>33</sup>

相乗的な薬理学的特性を有する様々な麻酔薬の組み合わせによって維持される全身麻酔が、バランス麻酔とされています。単一麻酔、つまり単独の麻酔薬だけを使用する麻酔法は、もはや現在は事実上実施されていません。

全静脈麻酔（TIVA）は、鎮静薬（プロポフォール）と鎮痛薬（例えば、レミフェンタニル）の組み合わせです。麻酔が吸入麻酔によって維持されている場合、亜酸化窒素、酸素、空気および揮発性麻酔薬からなるバランス麻酔が使用されます。

今日では、「バランス麻酔」という用語は、主にオピオイド（鎮痛）と吸入麻酔（鎮静）の組み合わせです。けれども、前述したように、この用語は厳密には定義されておらず、すでに局所麻酔や吸入麻酔など、麻酔薬の他の組み合わせによりすでに使用されています。

バランス麻酔は、世界中で最も頻繁に使用されている麻酔方法です。全身麻酔は、4つの異なる基本資質で構成されています。

- 鎮静
- 鎮痛
- 筋弛緩
- 自律神経抑制

バランス麻酔は、つまりこれらの要素に基づいてそれぞれの薬剤を組み合わせることによって達成されています。したがって、麻酔とは、一種類の薬を高用量で投与する代わりに、低用量の異なる麻酔薬を組み合わせることによって達成されます。

個々のコンポーネントを調整することで麻酔のバランスをうまく取ります。個々の薬剤の投与量を減らすことにより望ましくない副作用の発生が稀にしか起こらなくなり、全体的に麻酔変動の影響を受けにくくなります。

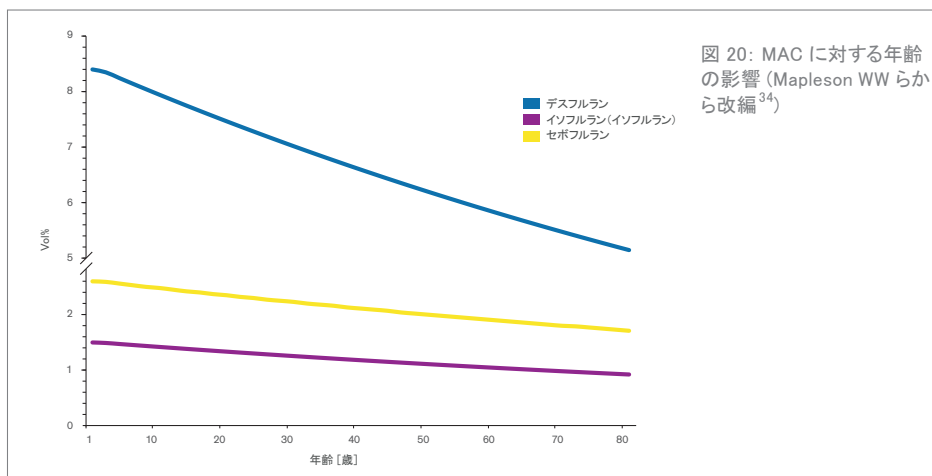
一般的なバランス麻酔では、揮発性麻酔薬、亜酸化窒素、オピオイドおよび筋弛緩剤が組み合わされています。患者は、揮発性麻酔薬によって意識を消失します。揮発性麻酔薬は、静脈麻酔薬よりも、術中覚醒をより効果的に防ぎます。EEG をモニタリングすることによる麻酔深度測定が不可欠だと思われませんが、これは静脈麻酔による個体差の大きさによるもので、バランス麻酔を論じる際に術中覚醒することを防ぐための議論の対象となり続けるでしょう、しかしその議論は不要のように思われます。

また、揮発性麻酔薬は筋弛緩作用を有するため、筋弛緩薬効果が高まります。亜酸化窒素とオピオイドの使用は、揮発性麻酔薬の必要量を10%～15%減らします。より低いガス濃度の結果として、組織ガス飽和度も低下します。これは、術後の覚醒を加速させます。



### MAC 値に影響を与えるその他の要因

MAC 値に対する年齢の影響は、Nickalls と Mapleson により、広く述べられています。このように、懐胎32週から1歳まで MAC 値は上昇し、加齢とともに下がっていきます<sup>31</sup>。



乳児は高い吸入麻酔濃度を必要とします。これらは加齢とともに低下します。同等の麻酔深度を達成するために、年齢により、同じ麻酔薬でも異なるMAC 値が必要とされます。全身麻酔と局所麻酔を組み合わせることにより、揮発性麻酔薬や他の鎮静薬の投与を減らすことができます。この麻酔プロセスにより低いMAC値で麻酔レベルを一定に維持することができ、十分に刺激に耐えることができます。

今日一般的に行われているように、オピオイドや静脈麻酔薬の鎮静薬が前投与される場合、MAC0.8~1.2程度の揮発性麻酔薬により十分な麻酔維持を得ることができます。これらの値を超えることは、薬理的にも、

麻酔科学的な観点からも合理的ではありません。

それどころか、過剰なMAC 値はかなりのリスクが生じ、周術期の疾病率と死亡率が増加します。

Eger らは、回復時間が明らかに長期化し、高齢患者における揮発性麻酔薬に関連する術後合併症として、認知障害に罹る可能性を増加させたとしています。<sup>32</sup>。これに関する大規模なメタ分析からのデータでは、4歳に達するまでの過剰な揮発性吸入麻酔薬投与が認知発達障害をもたらす可能性があることを示しています。

MAC 値を 1.2 より上げるべき合理的な理由はありません。

以上より、脂肪に溶けこみにくい、つまり力価の低い揮発性麻酔薬の使用が、麻酔深度を最もコントロールしやすいことを結論付けることができます。

肺泡分圧は、揮発性麻酔薬の摂取量を決定する要因であるため、この値を増加させることにより麻酔導入の速度を早めるより麻酔深度を深くすることは明らかです。肺泡の圧力は、吸気濃度、肺泡換気、機能的残気量と血液中の揮発性麻酔薬の溶解度に依存します。

したがって、私共は特に、セボフルラン(0.65)とデスフルラン(0.45)のような低い血液/ガス分配係数を持つ吸入麻酔薬をお勧めします。

これとは対照的に、イソフルランは1.4と比較的血液/ガス分配係数が高く、取り込みと排泄に時間がかかるため、低流量麻酔にはあまり適しません。

気化器の設定とフレッシュガスフローを増加させることと静脈麻酔薬を用いることで急速な麻酔導入を達成することができます。さらに、気化器設定を0にすることにより、イソフルランのMAC 値が高すぎる場合に下げることができます<sup>28</sup>。

表 2: 揮発性麻酔薬毎の薬物動態及び薬力学的特性 (バウムJAらから改編<sup>28</sup>)

溶解度	イソフルラン	セボフルラン	デスフルラン
λ 血液/ガス	1.4	0.65	0.42
λ 脂肪/ガス	64	34	12
λ 脂肪/血液	45	48	27
代謝			
生体内変化(%)	< 1.0	3-5	< 0.1
麻酔薬の強さ			
MAC ( vol%)	1.2	2.0	6.0
MAC Awake	0.4	0.7	2.0
MAC 3-5 歳	1.6	2.5	8.6
MAC およそ 30 歳	1.2	2.1	7.3
MAC およそ 70 歳	1.1	1.5	5.2

### 3.5 フレッシュガスフロー減少の影響

高流量のフレッシュガスフローを使用する場合、フレッシュガスの組成は、回路システム(フレッシュガスフロー→分時換気量)に該当します。高流量を用いる麻酔の場合、麻酔システムにおける吸気と呼気の麻酔薬濃度の変化は急速かつ同様の变化をもたらします。フレッシュガスフローを低減すると、フレッシュガスの組成と比較して、回路システム内のガスの組成が変化します。加えて、低い流量時は、回路システム内のガス組成の変化により、吸気と呼気麻酔薬の濃度は非常にゆっくりと変化します。したがって、時定数は、フレッシュガスフローに反比例します。これは例えば半閉鎖式回路で低流量、極低流量、もしくは閉鎖式回路の麻酔器を使用する際に適用されます。

特に麻酔の終盤に気化器を手術終了前約10分から15分間遮断し、麻酔薬の供給を停止することで、この効果を利用することができます。低いフレッシュガスフローの長期間の時定数により、徐々にウォッシュアウトが起こるため、回路システム中の麻酔薬濃度にわずかな低下のみが生じます。高いフレッシュガスフローは、麻酔薬の非常に急速なウォッシュアウトをもたらし、患者の回復にかかる時間を非常に短くすることが出来ます。

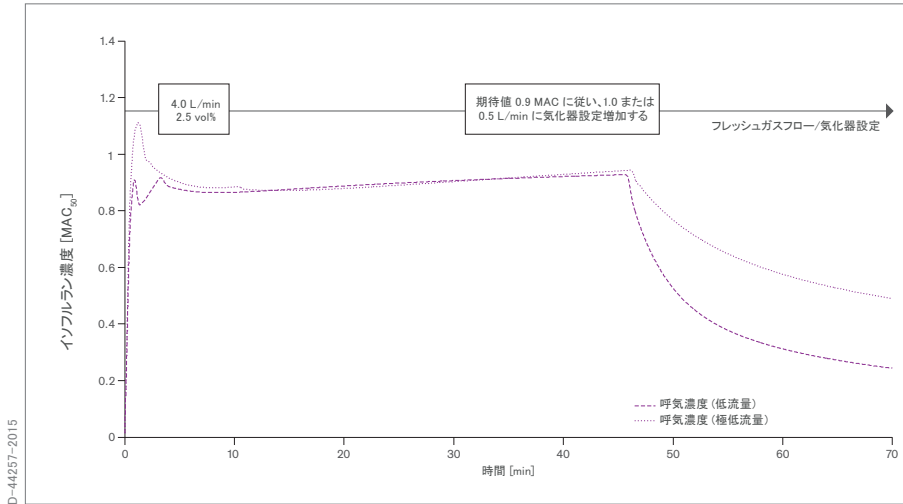


図 21: 吸入麻酔時の呼気イソフルラン濃度の比較。O<sub>2</sub>/Air をキャリアガスとする各種フレッシュガスフロー（低流量対極低流量）

Bailey<sup>25</sup>に従った、5コンパートメントモデルに基づく実例的グラフ

期待値: 呼気濃度 0.9 MAC

気化器の設定: 手順ダイアグラムもご覧ください。酸素/空気をキャリアガスとする極低流量麻酔 (p. 52/53)。

4.0 L/min の初期段階と2.5 vol% イソフルランの気化器設定。いったん期待値 0.9 MAC に達したら、フローを 1.0 または 0.5 L/min まで減らします。0.9 MAC の呼気イソフルラン濃度を維持するため、フレッシュガスフローが低ければ低いほど、気化器設定は高くしなければなりません。

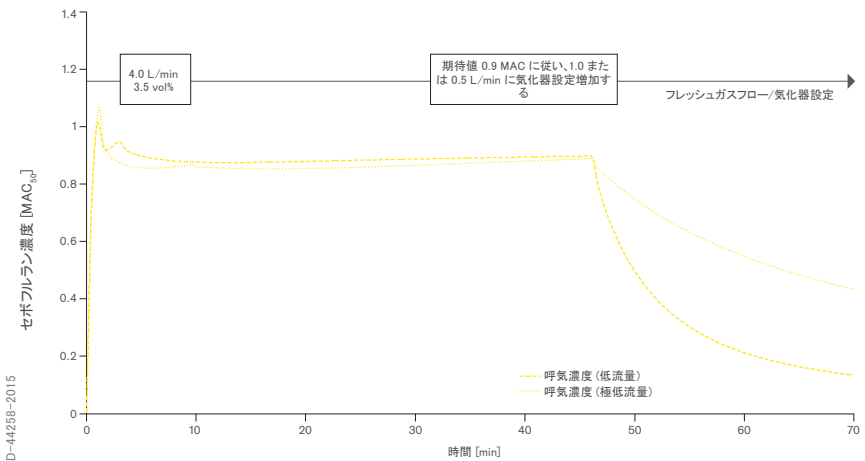


図 22: 吸入麻酔時の呼気セボフルラン濃度の比較。O<sub>2</sub>/Air をキャリアガスとする各種フレッシュガスフロー（低流量対極低流量）

Bailey<sup>25</sup>に従った、5コンパートメントモデルに基づく実例的グラフ

期待値: 呼気濃度 0.9 MAC  
気化器の設定: 手順ダイアグラムもご覧ください。酸素/空気をキャリアガスとする極低流量麻酔 (p. 52/53)。

4.0 L/min の初期段階と3.5 vol% セボフルランの気化器設定。いったん期待値 0.9 MAC に達したら、フローを 1.0 または 0.5 L/min まで減らします。0.9 MAC の呼気セボフルラン濃度を維持するため、フレッシュガスフローが低ければ低いほど、気化器設定は高くしなければなりません。

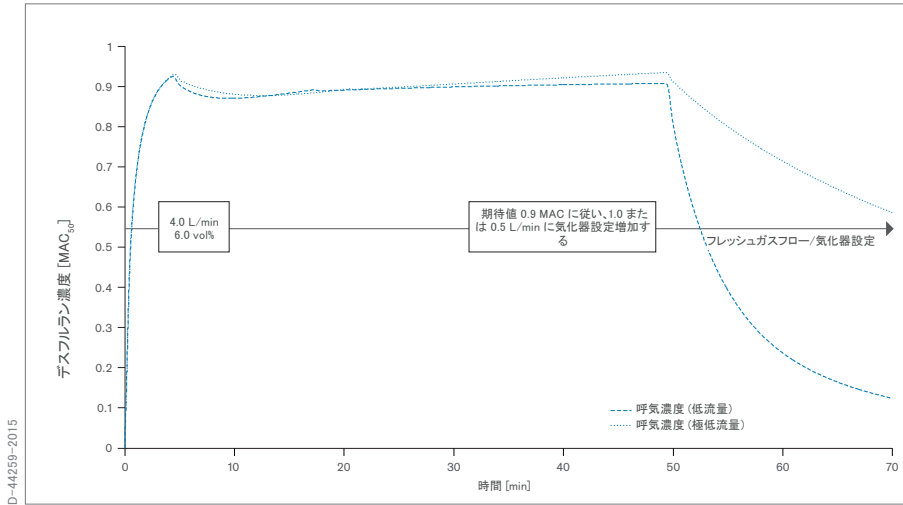


図 23: 吸入麻酔時の呼気デスフルラン濃度の比較。O<sub>2</sub>/Air をキャリアガスとする各種フレッシュガスフロー（低流量対極低流量）

Bailey<sup>25</sup>に従った、5コンパートメントモデルに基づく具体的なグラフ

期待値: 呼気濃度 0.9 MAC

気化器の設定: 手順ダイアグラムもご覧ください。酸素/空気をキャリアガスとする極低流量麻酔 (p. 52/53)。

4.0 L/min の初期段階と6 vol% デスフルランの気化器設定。

いったん期待値 0.9 MAC に達したら、フローを 1.0 または 0.5 L/min まで減らします。0.9 MAC の呼気デスフルラン濃度を維持するため、フレッシュガスフローが低ければ低いほど、気化器設定は高くなければなりません。

## 3.6 モニタリング

モニタリングの目的で、我々は回路システム内の麻酔ガスに対して制限を加えています。これは主に異なるガス ( $O_2$ , Air,  $N_2O$  と揮発性麻酔薬) の設定と患者の摂取量です。高いフレッシュガスフロー設定では回路内のガスの組成はフレッシュガスの組成と近いものであり、低いフレッシュガスフローでは回路内のガスの組成はフレッシュガスの組成とかなり異なります。患者の血行動態のルーチンモニタリングは、選択されたフレッシュガスフローから完全に独立しています。

麻酔の専門家の機関 (DGAI, BDA)\*による技術義務や推奨だけでなく、大学病院でも、このように必要なモニタリングを規定しています。これには、特に麻酔医が一貫してその場にいることと、患者の臨床的モニタリングを行うことが含まれます。また、モニタリングには心電図を継続して読み取ること、血圧を定期的にチェックすること、人工呼吸の吸気圧と呼気換気量の測定が含まれます。モニタリングでは、ISO 21647 または ISO 80601-2-55 の規制が適用されます。吸気酸素濃度、呼気麻酔ガス濃度と呼気  $CO_2$  濃度、吸気圧と分時換気量のモニタリングは必須です。そのために、アラームをトリガーする自動化したアルゴリズムが必要となります。特に、吸気酸素濃度は、アラームシステムによりモニタリングされる必要があります。酸素症を防ぐため、 $FiO_2$  のアラームは 28% で設定される必要があります。

麻酔ガス濃度 (フレッシュガス組成-回路システム内のガス濃度) の大きな差が生じるため、特に低流量・極低流量麻酔に不慣れた医師にとって、呼気・吸気麻酔ガス濃度のモニタリングが非常に重要となります。

\*DGAI = 麻酔および集中治療のためのドイツ協会  
BDA = ドイツ麻酔科医の専門職協会



麻酔薬濃度、酸素濃度と  $\text{CO}_2$  は、吸気と呼気共にモニタリングする必要があります。

回路システムから二酸化炭素を化学的に除去することが、極めて重要です。再呼吸システムでは、回路システムに二酸化炭素が蓄積される結果、呼吸性アシドーシスが起こるため、常に二酸化炭素アブソーバーが消耗していないことを確認しなければなりません。ソーダライムの色の変化が十分な安全性を提供するわけではありません。



## 04 極低流量麻酔の実施

4.1	酸素/空気をキャリアガスとする極低流量麻酔	52
4.1.1	実用的なヒント	54
4.1.2	酸素/空気の使用についての議論	55
4.2	酸素/空気をキャリアガスとする極低流量麻酔	58
4.2.1	実用的なヒント	60
4.2.2	純酸素の使用についての議論	62
4.3	酸素/亜酸化窒素をキャリアガスとする極低流量麻酔	68
4.3.1	実用的なヒント	70
4.3.2	議論	73

## 04 極低量麻酔の実施

### 4.1 酸素/空気をキャリアガスとする極低流量麻酔

概略手順\*

#### 前投薬

---

通常モデルに従って前投薬

#### 導入

---

- フェイスマスクで1～3分間、6L/min で100%酸素で酸素化
- 静脈麻酔もしくは吸入麻酔による導入
- 鎮痛と筋弛緩(注意: 導入オピオイドを20% 高く投与する必要があるかもしれません)
- 気管挿管または喉頭マスクの挿入
- 患者回路への接続

#### 初期段階

---

- フレッシュガスフロー 設定

酸素 1 L/min,	空気 3L/min (40% 酸素と 4 L/min フレッシュガスフロー)
-------------	--

- 気化器設定 (図 21 ~ 23 もご覧ください)

イソフルラン	2.5 Vol%
セボフルラン	3.5 Vol%
デスフルラン	6 Vol%

- 吸気酸素濃度は、35 ~ 40 vol% の間で安定します。

\*すべての値は、臨床に向けてテストしたものです。しかし、個々のケースでは、値は患者ごとの個々の応答、使用される機械の性能や術式要件に応じて適合させなければなりません。

### いったんターゲット MAC 値 0.8 ~1 に到達したあとは

---

- 酸素0.3 L/min に、空気 0.2 L/min に減少させる(酸素濃度68% と 0.5 L/minの フレッシュガスフロー)
- 気化器設定の上昇
 

イソフルラン	5 Vol%
セボフルラン	5 Vol%
デスフルラン	8 vol% (図 21 ~ 23 もご覧ください)

### モニタリング

---

- 吸気酸素濃度の下限値を最低28 vol%に設定します。
- 分時換気量 (Minute volume) アラーム下限値を、期待値より 0.5 L/min 低く設定する。
- 呼吸システム内の麻酔薬濃度のモニタリング: イソフルランの上限を 2 ~ 2.5 vol%に、セボフルランを 3 ~ 3.5 vol% に、デスフルランを 8 ~ 10 vol% に設定する。
- ドレーゲル SmartPilot®View を使用すると、極低流量麻酔を有意義にサポートすることができます。

### 覚醒

---

- 手術終了直前に、気化器設定を約10分間0% まで下げる。
- 低流量 0.5 L/min を保持する。
- 自発呼吸に移行する。
- 縫合が終了したら、抜管前に 100% 酸素 6 L/min でシステムをフラッシュする。
- 通常の手続きに従って、患者の術後ケア。

## 4.1.1 実用的なヒント

### 長期間の時定数を使用して、麻酔の濃度を増加させる

---

- フレッシュガスフローは変えずに 0.5 L/min のまま。
- 気化器設定を 1 ~ 2 vol% 上昇させる (最大出力まで上げなければならない場合も)。
- いったん期待濃度に達したら、気化器の値を期待値より 0.5 ~ 1 vol% 高く設定する。

### 長期間の時定数を使用して麻酔の濃度を減少させる

---

- フレッシュガスフローは変えずに 0.5 L/min のまま。
- 気化器設定を 1 ~ 3.5 vol% 下げる。
- 期待濃度に達したら、気化器が以前の設定になっていることを確認してください。

### 短期間の時定数を使つての迅速な麻酔深度の変更

---

- 気化器を麻酔ガスの値の前後 0.5~1vol% に設定します。
- フレッシュガスフローを 4 L/min に増やします (1 L酸素、3 L空気)。
- いったん期待麻酔濃度に達したら—原則として 5 分後にフレッシュガスフローを 0.5 L/min まで再度減らします。
- すべての低流量麻酔では、呼気麻酔薬濃度を測定することが必須です。フレッシュガスフローを増加させて麻酔深度を短時間で深くさせる代わりに、追加の催眠薬または鎮痛薬の静脈内注射も考慮する必要があります。

#### 警告-吸気O<sub>2</sub>アラーム

---

- 選択された設定で、吸気酸素濃度が28 vol% 未満に低下するときは酸素のフレッシュガスフローを0.3 から 0.5 L/min まで上げ、空気を 0 L/min まで下げてください(100% 酸素と 0.5 L/min フレッシュガスフロー)。

#### 警告-フレッシュガスフローが低すぎます

---

- 分時換気量が低下し、最高気道内圧が低下し、麻酔器がフレッシュガス不足アラームを鳴らす、リザーバーバッグがつぶれる。
- フレッシュガスフローを 4 L/min (1 Lの酸素、3 Lの空気) まで増やして呼吸システムを充填する
- リークを探す (ホースシステム、に穴があいていないか、CO<sub>2</sub>アブゾーバーは正しく装着されているか?)。リークを修理できない場合、フレッシュガスフローを 0.5 L/min 増加させ、1 L/min (0.3 L/min 酸素と 0.7 L/min 空気または 45% 酸素で 1 L/min フレッシュガスフロー)の低流量麻酔に切り替えます。

#### 新しいソーダライムが不可欠です

---

- 吸気 CO<sub>2</sub> 濃度が上昇する場合はソーダライムを交換するタイミングです。

## 4.1.2 酸素/空気の使用についての議論

酸素/空気を用いて極低流量の麻酔を行うことの利点は、プロセスを簡略化・加速することができる点です。たとえば、亜酸化窒素を使わないことで極低流量麻酔と代謝流量麻酔を劇的に簡略化することができます。これは、いずれの外科的禁忌（脳内の介入、空気で満たされた体腔の膨張）並びにSecond Gas effect によるガス量の変動）を考慮する必要がないためです。また、亜酸化窒素を使わないことで、高流量段階が短くなり、プロセスが加速されます。十分な脱窒素とボリウムの不均衡を確

実に回避することが2番目に重要な点です。

この手順と低いフレッシュガスフロー 0.5 L/min への迅速な減少の結果、-いったん MAC 値が 0.8 に達すると-顕著なコスト節約が期待できます。現在の調査によれば、揮発性麻酔薬の消費量の60~70%が、ウォッシュイン段階の最初の10分間に消費されることによります。そのため、初期分布相の間に、供給されるフレッシュガス量が、個々のガス吸収量とシステムのリークに起因するガス損失よりも、小さくならないようにしなければなりません。

ドレーゲル社の麻酔システムにはフレッシュガスの不足を警告をするために、フレッシュガス不足アラームを備えています。さらにエコノメーターは、フレッシュガスの不足(たとえばリーク)を早期に発見するための低・極低流量麻酔を実施する際に、最適な「早期警告システム」として有用である可能性があります。しかし、常に麻酔器用のリザーバーとして利用されているバッグの充填を確認することで、ユーザーが十分な容量バランスをチェックすることが必要となります。

正常な体温で加湿される空気はkPaで次の分圧を有します。BTPS(体温、気圧、水蒸気飽和状態)条件下で、37°C、気圧= 100kPa= 747 mmHg):

$$p_{O_2} = 19.6 \text{ kPa}$$

$$p_{CO_2} = 0 \text{ kPa}$$

$$p_{N_2} = 74.1 \text{ kPa (これはまた、アルゴンやキセノン等の窒素下のすべての希ガスを含みます)}$$

$$p_{H_2O} = 6.3 \text{ kPa}$$



低流量フレッシュガスにて麻酔を行う際、上記の流量に従って進行すると、吸気 $O_2$ 濃度は35~40%になります。

より長時間の場合には、低溶解性のガス(窒素、メタン、アルゴン、水素)が蓄積する可能性があります。有害な可能性のあるガスは、いずれの場合にも検知されていません。酸素と窒素酸化物濃度の両方が影響を受けるほど顕著な濃度でシステム内に発現するのは、唯一、窒素だけです。5 L/min のフレッシュガスフローで断続的なフラッシュを行うことにより、低い溶解度を有するガスを洗浄することができます。したがって、いずれの場合にも、アラームの設定が非常に重要となります。私たちの病院では、アラームは最低吸気 $O_2$ 濃度 28% に設定しています。

キャリアガスとして純酸素を使用する際、極低流量麻酔は低酸素血症の偶発リスクの面で安全であり、また容易に実施できます。

窒素濃度 [vol%]

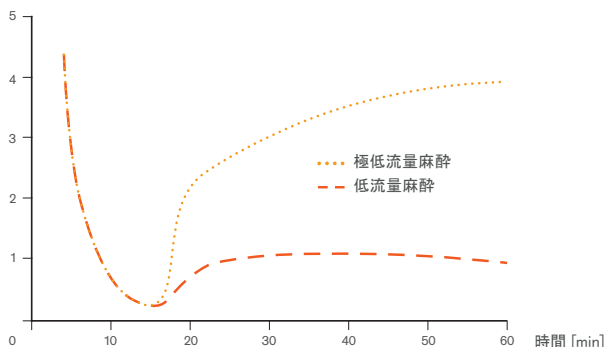


図 24: 呼吸システムにおける窒素の蓄積、体重 75 kg の患者 (Baum JA から改編<sup>8)</sup>)

## 4.2 酸素をキャリアガスとする最小流量麻酔

概略手順\*

(生後 6 カ月以上の患者から)

### 前投薬

通常のモデルに従って前投薬

### 導入

- フェイスマスクで 1～3 分間、6L/min で 100% 酸素で事前酸素化
- 静脈麻酔もしくは吸入麻酔による導入
- 鎮痛と筋弛緩(注意: 導入時にオピオイドを 20% 増量投与する必要がある可能性あり)
- 気管挿管 または喉頭マスクの挿入
- 患者を回路に接続

### 初期段階

- 1 ～ 8 分間のフレッシュガスフロー 設定  
100% 酸素 1 L/min,
- 気化器の設定
 

イソフルラン	5 ～ 6	Vol%
セボフルラン	5 ～ 6	Vol%
デスフルラン	12	Vol%
- 吸気酸素濃度は、年齢と体重により、60 ～ 80 vol% の間で安定します。

いったんターゲット MAC 値 0.8 ～ 1 に到達したあとは

- 100% 酸素フレッシュガスフローを 0.25 L/min から 0.35 L/min に減少させる

\*すべての値は、臨床に向けてテストしたものです。しかし、個々のケースでは、値は患者ごとの個々の応答、使用される機械の性能や術式要件に応じて適合させなければなりません。

- 麻酔薬濃度の変化—実用的なヒントをご覧ください (p. 60)

### モニタリング

---

- 吸気酸素濃度の下限値を最低28 vol%に設定します。
- 分時換気量 アラームの下限値を、期待値より 0.5 L/min 下に設定する。
- 呼吸システム内の麻酔薬濃度をモニタリング: イソフルラン上限を 2 から 2.5 vol% に、セボフルランを 3 から 3.5 vol% に、デスフルランを 8 から 10 vol% に設定する。
- ドレーゲル SmartPilot®View を使用すると、極低流量麻酔を有意義にサポートすることができます。

### 覚醒

---

- 手術終了時に気化器設定を約 10 ~ 15 分間 0% まで減少。
- 低流量 0.35 L/min を保持する。
- 患者を自発呼吸に移行する。
- 縫合が終了したら、抜管前に100% 酸素 6 L/min でシステムをフラッシュする。
- 通常の手続きに従って、患者の術後ケア。

## 4.2.1 実用的なヒント

長期間の時定数を使用して、麻酔薬の濃度を増加させる

- フレッシュガスフローは変えずに 0.35 L/min のまま。
- 気化器設定を最大出力まで上げる。イソフルランの特徴: イソフルラン単剤で麻酔の深度を深くするには、イソフルラン気化器の出力を最大にしてのみ行われるべきですが、これは、同時にフレッシュガスフローを増やしながら行わなければなりません。
- 期待濃度に達したら、気化器が次の状態になっていることを確認してください:

イソフルラン	5 ~ 6 vol%
セボフルラン	5 ~ 7 Vol%
デスフルラン	12 ~ 14 Vol%

長期間の時定数を使用して麻酔の濃度を下げる

- フレッシュガスフローは変えずに0.35 L/min のまま。
- 気化器を閉じます。期待する低濃度に到達する直前に、気化器を次のように設定します:

イソフルラン	4.5 Vol%
セボフルラン	4.5 ~ 5 vol%
デスフルラン	8 ~ 12 vol%

短期間の時定数を使つての迅速な麻酔深度の変更

- フレッシュガスフローを 4L/min、100% 酸素まで増やします(注意: 必要に応じて気化器設定を調整/減少させる)。
- いったん期待麻酔濃度に達したら—原則として 1 ~ 3 分後—フレッシュガスフローを0.35 L/min まで再度減らします。
- 気化器を次のように設定する:

イソフルラン	5 ~ 6 vol%
セボフルラン	4.5 ~ 5 vol%
デスフルラン	8 ~ 12 vol%

- すべての低流量麻酔において、呼吸システム内の呼気麻酔薬濃度を測定する必要があります。フレッシュガスフローを増加させて麻酔深度を短時間で深くする代わりに、鎮静剤や鎮痛剤の追加の静脈内注入も考慮すべきです。

#### 警告-吸気 O<sub>2</sub> アラーム

---

- 選択された設定で、吸気酸素濃度が28 vol% 未満まで低下するとき、酸素のフレッシュガスフローを 0.5 L/min まで上げてください。
- リークがないか、システムをチェックしてください
- 酸素測定が正常に作動しているか確認してください

#### 警告-フレッシュガスフローが低すぎます

---

- 分時換気量が低下し、最高気道内圧が低下し、麻酔器がフレッシュガス不足アラームを鳴らす、リザーバーバッグが虚脱。
- 約1分間フレッシュガスフローを 2 L/minまで上昇させ、呼吸システムを充填してください。
- リークを探す (ホームシステム内の穴、バッグCO<sub>2</sub>アブソーバーは正しく装着されているか?)。リークを修理できない場合、100% 酸素を伴うフレッシュガスフローを 0.5 L/min 増加させ、極低流量または低流量麻酔を 1 L/min に変更してください。

#### 新しいソーダライムが不可欠です

---

- 吸気CO<sub>2</sub> 濃度とソーダライムを観察します。吸気 CO<sub>2</sub> 濃度が上昇する場合は、ソーダライムを交換するタイミングです。

## 4.2.2 純酸素の使用についての議論

酸素/亜酸化窒素または酸素/空気混合ガスを使用しない 極低流量麻酔を一般的に代謝流量麻酔と呼んでいます。

純酸素をキャリアガスに使用することにより、麻酔吸入開始時の脱窒素を省略することができます。これは、亜酸化窒素を ウォッシュインする必要がないためです。したがって、再呼吸システムのアドバンテージが最初から利用できるようになります。初期の高いフレッシュガスフローは、ほんの短期間の使用か、あるいは全く使用せずに管理することも可能です。

イソフルランの気化器出力は 5 ~ 6% (製造業者やモデルの年式により異なります) で、セボフルランは 8%、デスフルランは 18% です。事前酸素化の後、吸入麻酔の開始時に低いフレッシュガスフローを選択することができます。フレッシュガスフローのレベルは、適切な麻酔ガス濃度が確立される時間に依存します。フレッシュガスフローが高ければ高いほど、より迅速に再呼吸システムで期待される麻酔ガス濃度が達せられます。フレッシュガスフローが低ければ低いほど、揮発性麻酔薬の濃度はゆっくりと上昇します。

私たちの臨床上の経験から、回路システム内で適切な麻酔薬濃度に達することができるよう、フレッシュガスフローは 0.5 ~ 1 L/min とすることを推奨します。これにより、いずれの吸入麻酔薬を使用しても、5 ~ 7 分以内で MAC 値 0.9 に達することができます。チオペンタールやプロポフォールなどの静脈麻酔薬で導入する場合は、静脈麻酔薬の血漿濃度が徐々に低下するのに対して、吸入麻酔薬濃度が上昇するため、7~9分で麻酔深度は安定します。

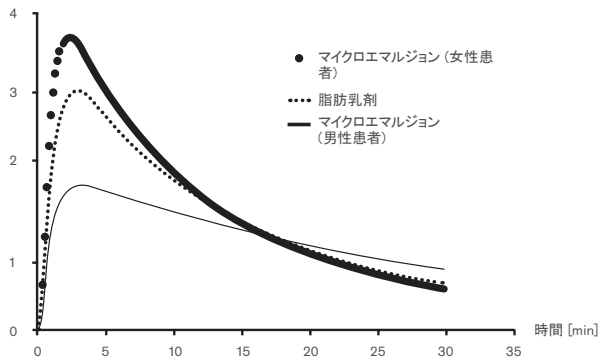
作用部位におけるプロポフォール濃度[ $\mu\text{g}/\text{mL}$ ]

図 25: 体重65キログラム、身長170センチ、44歳の患者の様々なエマルジョン（マイクロエマルジョンおよび脂肪乳剤）でのプロポフォール2 mg / kg の静脈内単回投与のシミュレーション。効果部位濃度(Kim KMらから改編<sup>35</sup>)

D-44261-2015

現代の麻酔ガスは、代謝がわずかで可溶性が低いため、制御しやすくなっています。その結果、回路システムへの麻酔ガス充填する時間は、以下の要因によって簡単に求められます。大部分は、回路システムの容積と気化器の最大出力、並びに患者の肺容量および体重に依存します。

この事実は、ドレーゲル麻酔器Primus と Zeus を使用しての麻酔ガスのセボフルランとデスフルランの流入率に関する研究によって確認されています。<sup>36</sup> 次の図から分かるように、差はわずかで、臨床的にあまり問題となりません。（フレッシュガスモードでフレッシュガスフロー流入 0.5 L/min ~ 1 L/min）。ただし、イソフルランでは、臨床的にはフレッシュガスフロー 1 L/min でのみ達成できます（図 30 をご覧ください）。

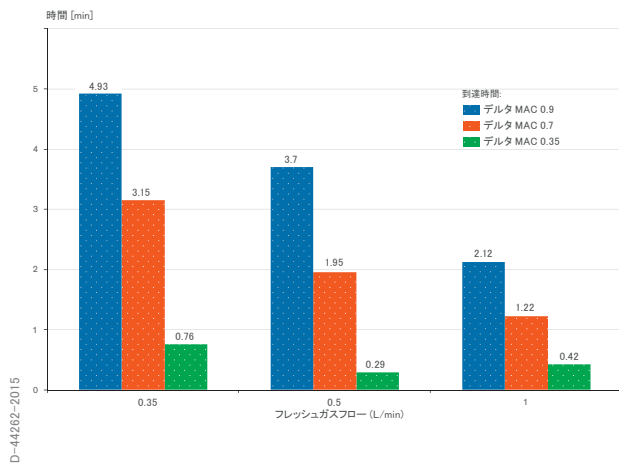


図 26: Primus データセボフルラン

(最大気化器出力 8 Vol%  
4 × MAC に相当)

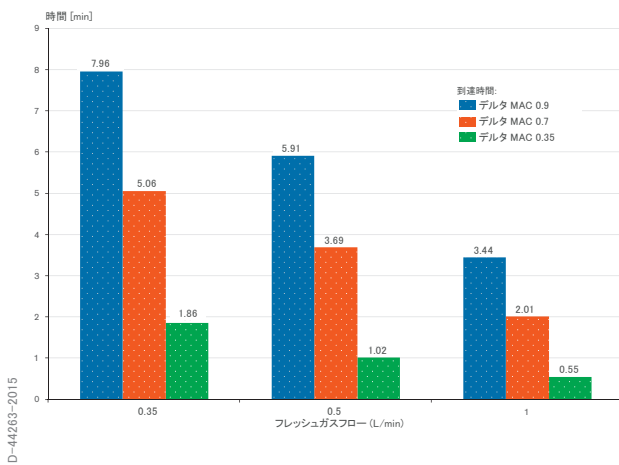


図 27: Primus データデスフルラン

(最大気化器出力 18 Vol%  
3 × MAC に相当)



D-44264-2015

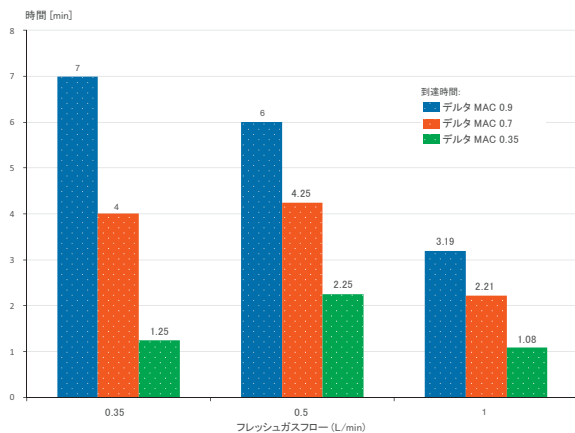


図 28: Zeus データセボフルラン-フレッシュガスモードでの流入

(最大気化器出力 8 Vol%  
4 × MAC に相当)

D-44265-2015

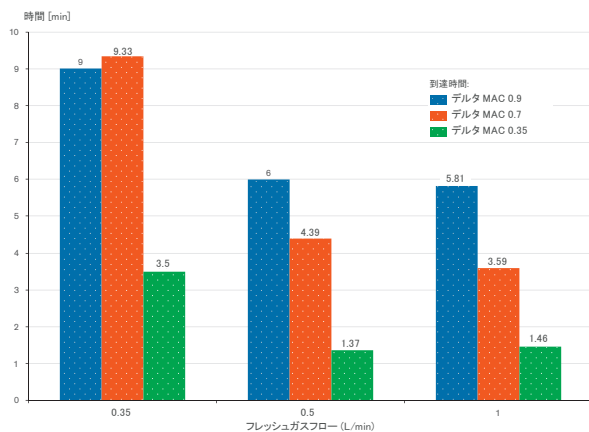
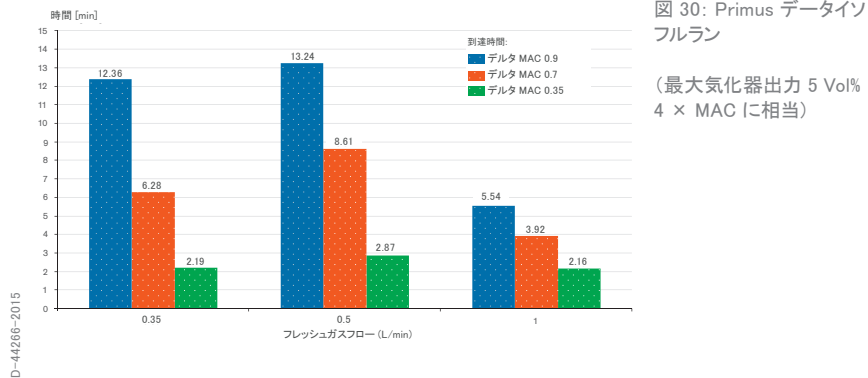


図 29: Zeus データデスフルラン-フレッシュガスモードでの流入

(最大気化器出力 18 Vol%  
3 × MAC に相当)



備考 図 21 ~ 25 の全データは、参考文献<sup>36</sup>より引用しています。

いったん回路システム内の麻酔ガス濃度が期待値（つまりMAC 0.9）に達すると、フレッシュガスフローはさらに減らすことができます（つまり 0.5 から 0.35 L/min へ、100% O<sub>2</sub>）。この手順により、再呼吸システムを適切に使用することが出来ます。

極低流量麻酔の場合と同様に、気化器は操作終了直前に約 10 分間停止することができます。

同時に、麻酔ガスをウォッシュアウトするため、最後の縫合時にフレッシュガスフローを 4 ~ 6 L/min に増加させます。覚醒段階でさらに高いフレッシュガスフローを設定しても、麻酔ガスをより迅速にウォッシュアウトすることはありません。これは、フレッシュガスフローが 4 ~ 6 L/min のとき、再呼吸の部分が既に 2.5% 未満となっているためです。フレッシュガスフローを3倍に当たる 18 L/min に増やしても、再呼吸率は 2.5 から約 0.75% までしか減少せず、臨床的にはほんのわずかな逆行加速しかもたらしません。

代謝流量麻酔では、フレッシュガスフローを顕著に減少させても、一定量の余剰ガスと標準化されているフレッシュガスの組成は維持されます。このプロセスは、Baum 教授が述べているように、ルーチンの臨床手順中に行うことができます。

これはつまり、純酸素をキャリアガスとして使う低流量・極低流量麻酔は酸素/空気混合ガスや酸素/亜酸化窒素混合ガスをキャリアガスに使う低流量・極低流量麻酔と比較して、さらにもうひとつを単純化することができます<sup>9</sup>。

Vechta と Damme の病院では、2004 年以來、酸素をキャリアガスとする 100,000 以上の麻酔管理が行われてきています<sup>37,38</sup>。

## 4.3 酸素/亜酸化窒素混合ガスをキャリアガスに 使う極低流量麻酔

概略手順\*

### 前投薬

通常のモデルに従って前投薬

### 誘導

- フェイスマスクで100%酸素、6L/minで1～3分間で酸素化
- 静脈麻酔もしくは吸入麻酔による導入
- 鎮痛と筋弛緩
- 気管挿管または喉頭マスク
- 患者を回路に接続

### 初期段階

フレッシュガスフロー の設定酸素 1.4 L/min、亜酸化窒素 3L/min (32% 酸素と 4.4 L/min フレッシュガスフロー)

- 気化器の設定
 

イソフルラン	1 ~ 1.5 Vol%
セボフルラン	2 ~ 2.5 Vol%
デスフルラン	4 ~ 6 Vol%
- 吸気酸素濃度は、30 ~ 40 Vol% の間で安定します。

\*すべての値は、臨床に向けてテストしたものです。しかし、個々のケースでは、値は患者ごとの個々の応答、使用される機械の性能や術式要件に応じて適合させなければなりません。

これらの模式的な説明については、印刷済のコピーもご用意しています。ドレーゲル社に直接、ご請求ください。

### いったんターゲット MAC 値 0.8 ~1 に到達したあとは

- フレッシュガスフローを 0.5 L/min に減少(0.3% 酸素と亜酸化窒素  
0.2 L/min、60% 酸素と 0.5 L/min フレッシュガスフロー)
- 気化器設定を上げる
 

イソフルラン	2.5 Vol%
セボフルラン	3~3.5 Vol%
デスフルラン	5 ~7.5 Vol%

### モニタリング

- 吸気酸素濃度の下限値を最低28 vol%に設定します。
- 分時換気量アラームの下限値を、期待値より 0.5 L/min 下に設定する。
- 呼吸システム内の麻酔薬濃度をモニタリング: イソフルラン上限を  
2 ~ 2.5 Vol% に、セボフルランを 3 ~3.5 Vol%に、デスフルランを  
8 ~ 10 Vol%に設定する。
- ドレーゲルSmartPilot®View を使用すると、極低流量 麻酔を有意義にサ  
ポートすることができます。

### 覚醒

- 手術終了時に気化器設定を約10 ~ 15 分間 0% まで減少。
- 低流量 0.5 L/min を保持する。
- 自発呼吸に移行する。
- 縫合が終了したら、抜管前に  
100% 酸素 6 L/min でシステムをフラッシュする。
- 通常の手続きに従って、患者の術後ケア。

### 4.3.1 実用的なヒント

#### 長期間の時定数を使用して、麻酔の濃度を増加させる

---

- フレッシュガスフローは変えずに 0.5 L/min のまま。
- 気化器設定を 1 ~ 2 vol% 上昇させる (最大出力まで上げなければならぬ場合も)。
- いったん期待濃度に達したら、気化器の値を期待値より 0.5 ~ 1 vol% 高く設定する。

#### 長期間の時定数を使用して麻酔の濃度を減少させる

---

- フレッシュガスフローは変えずに 0.5 L/min のまま。
- 気化器設定を 1 ~ 3.5 Vol% 下げる。
- 期待濃度に達したら、気化器が以前の設定になっていることを確認してください。

#### 短期間の時定数を使っての迅速な麻酔深度の変更

---

- 気化器を麻酔ガスの値の前後 0.5 Vol% に設定します。
- フレッシュガスフローを 4.4 L/min に増やします (1.4 L 酸素、3 L 亜酸化窒素)。
- いったん期待麻酔濃度に達したら—原則として約 5 分後—フレッシュガスフローを 0.5 L/min まで再度減らします (0.3 L 酸素、0.2 L 亜酸化窒素)。
- すべての低流量麻酔では、呼気麻酔薬濃度を測定することが必須です。フレッシュガスフローを増加させて麻酔深度を短期間で深める代わりに、追加の鎮静薬または鎮痛薬の静脈内投与も考慮します。

#### 警告—吸気O<sub>2</sub>アラーム

---

- 選択された設定で、吸気酸素濃度が28 Vol% 未満まで低下するとき、酸素のフレッシュガスフローを0.3 から 0.35 L/min まで上げ、亜酸化窒素を0.2 から 0.15 L/min まで下げてください(70% 酸素と 0.5 L/min フレッシュガスフロー)。

#### 警告—フレッシュガスフローが低過ぎます

---

- 分時換気量が低下し、気道内圧が低下し、麻酔器がフレッシュガス不足アラームを鳴らす、リザーバーバッグが虚脱。
- フレッシュガスフロー を 4.4 L/min (1.4 Lの酸素、3 ℓの空気) まで上昇させ呼吸システムを充填してください。
- リークを探す (ホースシステム内の穴、CO<sub>2</sub>アブゾーバーは正しく装着されているか?)。リークを修理できない場合、フレッシュガスフローを 0.5 L/min増加させ、低流量麻酔を 1 L/min (0.4 L/min 酸素と 0.6 L/min 空気または 40% 酸素と 1 L/min フレッシュガスフロー) に切り替えます。

#### 新しいソーダライムが不可欠です

---

- 吸気CO<sub>2</sub> 濃度とソーダライムを観察します。吸気 CO<sub>2</sub> 濃度が上昇する場合はソーダライムを交換するタイミングです。

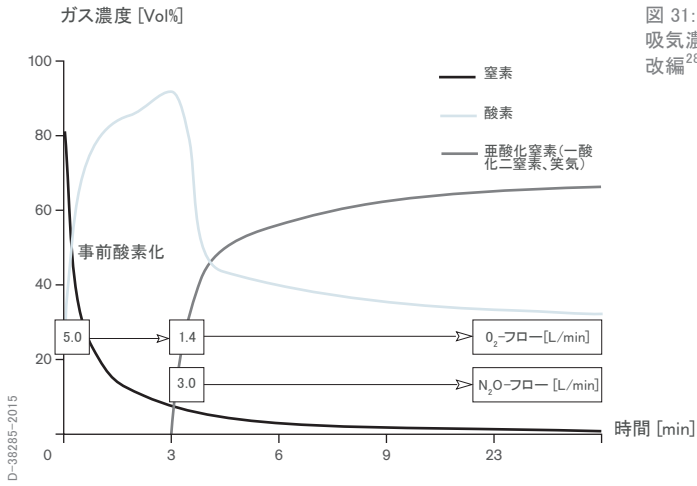


図 31: 麻酔ガスの組成、吸気濃度 (Baum J から改編<sup>28)</sup>)



## 4.3.2 考察

この手順は、まだ最新ののでしょうか？

亜酸化窒素 ( $N_2O$ ) は、窒素酸化物のひとつです。1772 年に、アメリカ人化学者 Joseph Priestley が無色の亜酸化窒素を発見しました。Humphry Davy (1778 年 ~ 1829 年) はイギリスの化学者ですが、今日、彼が初めてその鎮痛作用に言及した人物であると考えられています (1799 年)。しかし、19 世紀前半には、その刺激作用から亜酸化窒素は主に展覧会や市場での見世物として使われていました。亜酸化窒素パーティの報告も記録されています。スコットランドの歯科医、Horace Wells がはじめて科学的に利用し、1844年に抜歯に使用しました。その鎮痛効果が確立されてからは、亜酸化窒素はすべての麻酔ガスの中でも、世界的に最も頻繁に使用されてきました。

麻酔中の亜酸化窒素使用の議論において、亜酸化窒素を最大限に付加してもその麻酔効果はあまり優れていないことを忘れてはなりません。MAC 値0.1~0.15倍を超えずに揮発性麻酔薬の濃度を増加させることにより、代替することができます。亜酸化窒素の効果を代替するために、オピオイド(たとえば、スフェンタニル、レミフェンタニル、またはアルフェンタニル)を代替使用することができます。これらは付加的な効果を持つだけでなく、コントロールが容易です。

さらに、亜酸化窒素を使用する場合には、明らかにされている禁忌を守らなければなりません。特に脳神経外科手術においてコンプライアンスの低下による脳圧の上昇にリスクのある症例では亜酸化窒素は、使用することがなくなりました。新たな麻酔薬は最近の効果の高い制吐薬とともに使用されるようになってきています。

心臓手術では、心筋抑制や肺レジスタンスの増加を起す可能性があるため、亜酸化窒素を使用しないことをお勧めします。イレウスの危険性のある内臓の手術にも使用しないことをお勧めします。コストに対する圧力が上昇しているなか、ドイツコスト診断関連グループ(DRG)が導入される前から費用対効果を考慮することは、今日賢明なこととなっています。

非常に効果的な制吐薬以外にも、新しい麻酔薬は亜酸化窒素を完全に省略することができます。また、コストに関する圧力の上昇を考えると、費用対効果の分析が考慮されなければなりません。このことを背景に、亜酸化窒素の付加的使用は無視できるでしょう。

私たち自身の臨床経験と、2つの病院での経験により、100,000例以上の吸入麻酔と静脈麻酔を実施した結果、亜酸化窒素を一貫して省略しても、これまでのところ全く問題のないことが示されています。

しかし、ポジティブな特性もネガティブな特性も、論争の対象となっています。亜酸化窒素使用を支持する人々も、完全に省略する人々もいます。多くの麻酔では、亜酸化窒素麻酔は再呼吸システムにおけるキャリアガスとして知られ、信頼される成分となっています。言及される議論には、他のものとは比べて比較的簡単な制御性と顕著な鎮痛効果などがあります。亜酸化窒素の交感神経刺激効果は、吸入麻酔が持つ抑うつ効果を代償することができます。麻酔薬も節約することができます。さらに、マスク吸入中のSecond gas effect は、吸入麻酔の効果を加速させます。亜酸化窒素は、手術中の患者の意識を活発に保護し、麻酔薬に起因する脊髄防御の反射を抑えます。

以上のような利点にかかわらず、将来的に亜酸化窒素をルーチンとして使用することには反対意見が多くあります<sup>39</sup>。

- 動物実験では、窒素と比較して、亜酸化窒素は胎児に対して毒性と催奇形性があります。

- 亜酸化窒素は環境に有害であり、温室効果を進めます。
- 全体的なコンセプトとして、吸入麻酔におけるそのメリットは、あまり重要ではありません。
- 亜酸化窒素の使用を長期間続けると、骨髄に巨赤芽球の変更が発生することがあります。
- これは、ビタミン B<sub>12</sub> 不足に起因する、末梢血液の像の変化をもたらします。これは、神経細胞内の脱髄過程におけるDNA合成のを阻害を併発する場合があります。過去数年間には、亜酸化窒素を使用した比較的短い麻酔後に、特に厳格な菜食主義者とビーガンの中で深刻な神経障害の発生が報告されています。
- 亜酸化窒素は脳血管拡張をもたらし、頭蓋内圧の上昇につながります。これは、特に限られた脳迎合性を持つ患者に起こります。亜酸化窒素はその濃度勾配に応じて、空気で満たされた腔と空間の中に拡散します。これらの空間が区画化されている場合、亜酸化窒素を使用する際の禁忌のため、これらの空間の圧力の増加または拡張が発生する可能性があります。
  - イレウス
  - 気胸
  - 気縦隔
  - 心嚢内気腫
  - 中耳の手術
  - 空気塞栓症
  - 神経外科手術、心臓外科、鼓膜の手術

亜酸化窒素を使用する際の更なる議論は、むしろ技術的な性質によるものです。したがって、亜酸化窒素の供給は完全に不要なものです。これは、物流と技術的なメンテナンスに関連する、潜在的なコスト節約につながります。麻酔器のガス投与システムを簡略化することもできます。亜酸化窒素を常に使用しない場合でも、普段の臨床では従来の麻酔器を用い、半閉鎖システムを使用して麻酔を行なうことができます。

亜酸化窒素の使用に反対する最大の議論は、それが低酸素ガスであるということです。つまり、外部からの酸素を混合しなければならないことを意味します。

## 05 麻酔器の技術的な要件

5.1 麻酔器の技術的な要件	78
5.2 麻酔ガスに応じた気化器最大出力	79
5.3 回路システム容量と時定数	83

## 05 麻酔器の技術的な要件

### 5.1 麻酔器の技術的な要件

最新の麻酔器は、極低流量麻酔の安全な実行を確保するためのすべての要件を満たしています。投薬システムおよび気化器は、最低流量範囲内にあっても、高精度で動作します。呼吸システムはコンパクトで密閉されています。また、洗練された監視モニタリングシステムが装備されています。これにより、トータルフレッシュガスフロー 1L/min未満でも 吸気酸素濃度、気道内圧、分時換気量と麻酔薬の濃度の連続監視を保証します。この技術的安全設計は、国内および国際的な基準や規制によって必須要件となっています。さらに、このタイプのモニタリングは、ドイツ麻酔と集中治療医学協会 (DGAI) の麻酔条項で、品質保証を規定するガイドラインにより必要条件とされています<sup>40</sup>

## 5.2 麻酔ガスに応じた気化器最大出力

従来の麻酔システムは呼吸回路から成り、その中にフレッシュガスが供給されます。揮発性麻酔薬は、フレッシュガスフローと混合し、また呼吸回路に供給されます。これはつまり、該当する呼吸回路のフレッシュガス供給およびサイズに応じて、フレッシュガスおよび回路内のガス組成は完全に異なっている、ということの意味します。(図5、図6、図7をご覧ください: Primus、Perseus A500 と Zeus IE を例とする、再呼吸システムガスフローダイアグラム)。

つまり、フレッシュガスフローが少なくとも十分な麻酔ガスが回路に供給できるようにするため、最大気化器出力は極めて重要となります。しかし、フレッシュガスフローが低いと、麻酔維持期では、気化器の出力は非常に迅速にその限界に達します。これにより、最大気化器出力はもはや、該当する麻酔ガスの MAC の 3倍–5倍ではなくなります。たとえば、250 L / min のフレッシュガスフローで、気化器は多くても12.5 ml /min のイソフルラン、20mL /min のセボフルランまたは45 ml /min のデスフルランしか供給しません。

デスフルランおよびセボフルランは、必要な麻酔ガスの呼気濃度を確立するための要件を満たしています。具体的には、セボフルランおよびデスフルランは、低溶解度であるという特徴です。最低フレッシュガスフローで、これらの麻酔ガスの最大気化器出力を使うには、閉鎖式麻酔器を推奨します。

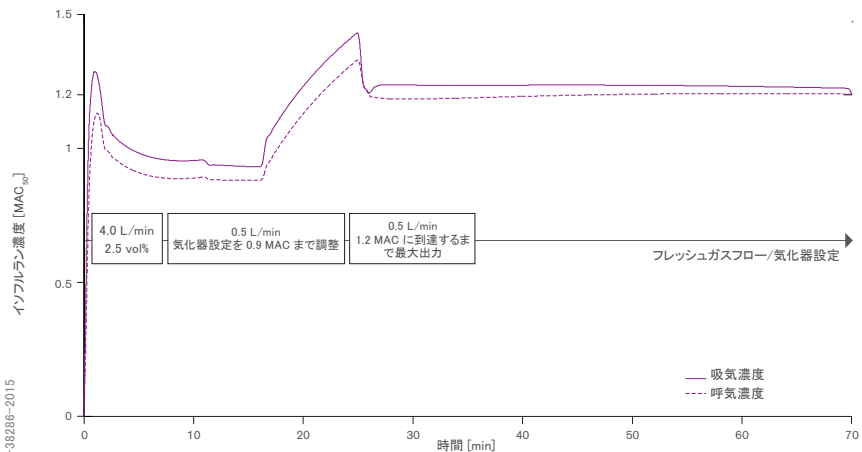


図 32: 吸入麻酔時の吸気と呼気のイソフルラン濃度。O<sub>2</sub>/Air をキャリアガスとする、フレッシュガスフローと最大気化器設定の関係

Bailey<sup>25)</sup>に従った、5コンパートメントモデルに基づく具体的なグラフ

目標値: 呼気濃度 1.2 MAC への上昇後の 0.9 MAC 気化器設定: 酸素-空気をキャリアガスとする極低流量麻酔手順のダイアグラムも併せてご覧ください (p. 52/53)。

はじめに 4.0 L/min イソフルランの気化器 2.5vol% に設定。0.9 MACの目標値に到達したら、0.5 L/min にフローを減少させ、気化器の設定値を 0.9 MAC まで増加させます。注記/ 長時間の麻酔 (> 90分)での気化器設定は、0.9 MACの目標値が維持されるよう、減少させる必要があります。

15 分後、呼気濃度 1.2 MAC に到達するまで、気化器設定を最大出力まで増加させます。

イソフルランの特徴: 0.25 L/min ~0.35 L/min のフレッシュガスフローでの代謝流量麻酔では、長い時定数を用いる 目標値 1.2 MACのイソフルラン濃度は、気化器の設定を最大出力まで上げ、同時にフレッシュガスフローを増加させることによって到達します。



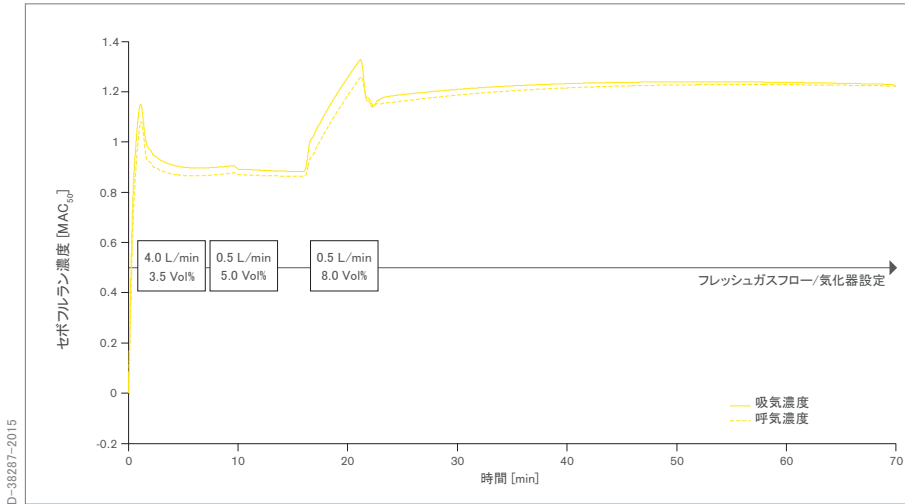


図 33: 吸入麻酔時の吸気と呼気のセボフルラン濃度。O<sub>2</sub>/Air をキャリアガスとする、フレッシュガスフローと最大気化器設定の関係

Bailey<sup>25</sup>に従った、5コンパートメントモデルに基づく具体的なグラフ

目標値: 呼気濃度 1.2 MAC への上昇後の 0.9 MAC 気化器設定: 酸素-空気をキャリアガスとする極低流量麻酔手順のダイアグラムも併せてご覧ください (p. 52/53)。

はじめに 4.0 L/min、セボフルラン気化器 3.5 Vol% に設定。0.9 MAC の目標値に到達したら、0.5 L/min にフローを減少させ、気化器の設定値を 5 Vol% まで増加させます。15 分後、呼気濃度 1.2 MAC に到達するまで、気化器設定を最大出力 (この場合は 8 vol%) に増加させます。

一定のフロー 0.5 L/min で、気化器設定を最大出力まで増加させることにより長い時定数を使って目標のイソフルラン濃度 1.2 MAC に到達します。

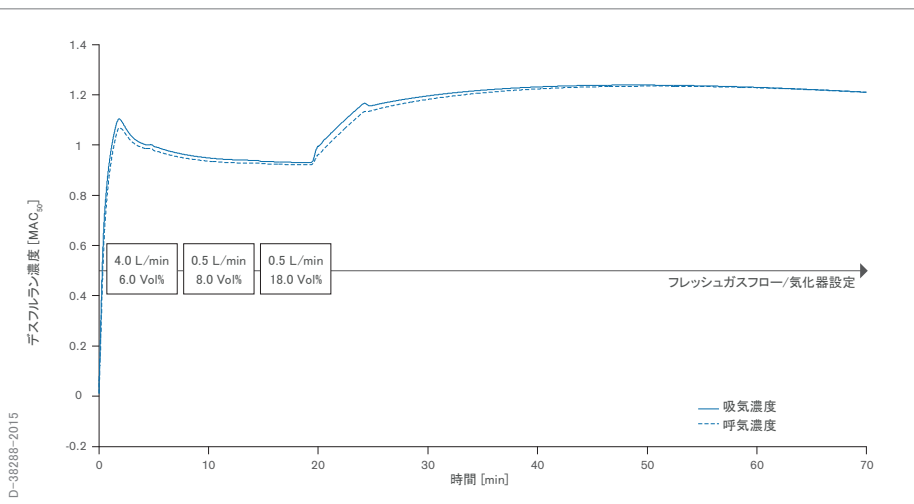


図 34: 吸入麻酔時の吸気と呼気のデスフルラン濃度。O<sub>2</sub>/Air をキャリアガスとする、フレッシュガスフローと最大気化器設定の関係

Bailey<sup>25)</sup>に従った、5コンパートメントモデルに基づく事例的グラフ

目標値: 呼気濃度 1.2 MAC への上昇後の 0.9 MAC 気化器設定: 酸素-空気をキャリアガスとする極低流量麻酔手順のダイアグラムも併せてご覧ください (p. 52/53)。

はじめに 4.0 L/min、デスフルラン気化器 6Vol% に設定。いったん、0.9 MAC の目標値に到達したら、0.5 L/min にフローを減少させ、気化器の設定値を 8 vol% まで増加させます。15 分後、呼気濃度 1.2 MAC に到達するまで、気化器設定を最大出力 (18 vol%) に増加させます。

一定のフロー 0.5 L/min で、気化器設定を最大出力まで増加させることにより、長期間定数を使って目標のデスフルラン濃度 1.2 MAC に到達します。

### 5.3 回路システム容量と時定数

時定数は、ガス投与装置の設定変更が呼吸システムでガス組成の変更にかかる時間を表わしたものです。

$$T = V_s / (V_b - V_u)$$

T = 時定数

$V_s$  = システム容量

$V_b$  = システムに送り出されるフレッシュガス量

$V_u$  = 患者により摂取される量 (患者摂取量)

Conway の公式から分かるように、時定数 T はシステム容量  $V_s$  (機械と肺の容量) に比例し、フレッシュガスの容量  $V_b$  に反比例します。

これは、回路システム容量が小さいほど給されるフレッシュガス量が大きくなり、その結果時定数が小さくなり回路システムの濃度変化が速くなります。



## 06 低流量麻酔の禁忌

## 06 低流量麻酔の禁忌

### 6.1 低流量麻酔の禁忌

危険のある、あるいは毒性のあるガスを持続的にウォッシュアウトする必要がある場合や、潜在的に危険性のある微量ガスが蓄積する可能性が高いときは極低流量の麻酔は禁忌です。連続的に十分なウォッシュアウト効果(約50%)を補償するため、フレッシュガスフローは少なくとも1L/min以上としてください。

同様に、低流量麻酔は、毒性ガス中毒(一酸化炭素、シアン化物中毒)には禁忌です。二酸化炭素を十分に呼出させる必要があり、揮発性麻酔薬の供給を直ちに停止する必要があるため、悪性高熱にも禁忌とされます。次に挙げる適応症においても、極低流量麻酔は危険だとされています: ケトアシドーシス性昏睡、糖尿病、またはケトアシドーシス性代謝状態を患っている患者(たとえば、拒食症)。アルコール中毒またはアセトン中毒などの患者で高脂溶性または水溶性ガスなどを呼出している場合も禁忌です。

医師の術前訪問、カンファランス中にも、患者特有のリスク議論しなければならないことは、言うまでもありません。したがって、麻酔手順、麻酔投与およびモニタリングに関して患者ごとに最適な麻酔法を検討する必要があります。

大きなリーク、不十分な麻酔深度、または潜在的に不十分な脱窒素がある場合、日常操作として、または術中合併症のために自発的に、断続的な洗浄(1~5分間、5L/min)の高流量段階が必要となる場合があります。しかし、フレッシュガスを短期的に増加させると、すでに達成されている呼吸ガスの状態を中断したり、損なったりすることも受け入れなければなりません。

禁忌を考慮すると、麻酔のほとんどのケースで流量フレッシュガス(0.25 L/min ~ 1L/min)で実施することができ、様々な状況下で信頼性が証明されているまとめることができます。





## 07 確立と概要

7.1 低流量麻酔の確立	90
7.2 将来の見込み—低流量麻酔	91

## 07 確立と概要

### 7.1 低流量麻酔の確立

専門家は私たちにケアをゆだねている患者が、麻酔下の事故によって低酸素で苦しむことこそが麻酔における最大の危険だと考えています。これは、日々の臨床で低・極低流量一麻酔を確立し実施することに対する批判の、主なポイントであると思われます。また、時として経験豊富な麻酔医は、これらの手順は研修医や若輩の麻酔科医には適していないという立場を取っています。

私たちの幅広い臨床経験から、この2点の批判に反論することができます：機器のアラーム設定が適切にされていれば、低酸素症は避けることができます。つまり、吸気 $O_2$ 濃度 28% と継続的な $paO_2$ 測定が必要になります。低・極低流量麻酔の実施は、トレーニングにも適しています。手術が十分に計画され、患者の個々のリスクが考慮された場合、想定される酸素摂取量は既に考慮に入れられており、酸素をキャリアガスとして麻酔を行う場合、非常に安全でシンプルに実施できる麻酔となります。

私たちは、本書で提供される概念により、この麻酔方法が安全であることを同僚のみなさんにお伝えできるのであれば幸いです。今日の麻酔器の安全性と、技術的能力により、低流量、代謝流量、および極低流量麻酔を選択することができます。

## 7.2 将来の見込み—低流量麻酔

麻酔技術を将来さらによいものとするために、患者年齢、体重および身長を入力すると低流量用量を提案する、アルゴリズムを機器にインストールすることが有用となるでしょう。ドレーゲルの SmartPilot View を使用すると、極低流量麻酔を有意義にサポートすることができます。

ここで再度キャリアガスとしての酸素を批判的に考察してみましょう。これら麻酔技術を行う最もシンプルな方法は、酸素をキャリアガスとすることに基づきます。もちろん、キャリアガスとして酸素を利用することが、論議されていることは私たちも承知しています。たとえば、急性心不全を患っている患者に、特に蘇生後に、高いFiO<sub>2</sub>を流すことは禁忌であることを示す論文がでていきます

さらには虚血再灌流時にも問題が生じる可能性があります。このような場合には、酸化性ストレスに対する細胞防御機構が尽き、増加した活性酸素への暴露に耐えられないようです。特に酵素および非酵素ラジカルインターセプタ（抗酸化保護システム）が尽き、二次的な結果としてDNA修復機構も尽きます。さらに、この問題に参考文献を強化するため、世界中でデータ収集が行われ、また私たちも研究とさらなるデータ収集を行っています。<sup>41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48</sup>

しかしながらキャリアガスとして酸素を使う待機手術(手術時間<8時間)の患者の大多数は、優れた低・極低流量流麻酔が実施されることには議論の余地はありません。これにより、吐き気を減少させ、創傷治癒が優れ、低酸素症のリスクが低くなり、手順が簡単に実施できるという潜在的なメリットが生じます。

要約すると、低流量麻酔は私たちの患者のために簡潔で、資源効率の高い、経済的で安全な手順なのです。

## 08 参考文献

8.1 参考文献	94
8.2 図の一覧	98
8.3 キーワードの索引	101
8.4 カラーコード	103

## 08 参考文献

### 8.1 参考文献

- 1 Onishchuk JL. The early History of Low-Flow Anaesthesia. In Fink, B.R., L.E. Morris, C.R. Stephen, eds. *The History of Anesthesia. Third International Symposium, Proceedings*. Park Ridge, Illinois: Wood Library-Museum of Anesthesiology, 1992:308-313
- 2 Foldes F, Ceravolo A, Carpenter S. The administration of nitrous oxide - oxygen anesthesia in closed systems. *Ann Surg.* 1952;136:978-81
- 3 Virtue R. Minimal flow nitrous oxide anesthesia. *Anesthesiology* 1974;40:196-8
- 4 Baum JA, Enzenauer J, Krausse T, Sachs G. Soda lime - service, consumption and costs in relation to fresh gas flow. *Anaesthesiologie Reanimation* 1993;18(4):108-13 191
- 5 Baum JA, Aitkenhead AR. Low flow anaesthesia. *Anaesthesia* 1995; 50 Suppl: 37-44
- 6 Baum JA. Narkosesysteme. *Anaesthesist* 1987;36:393-399
- 7 Hönemann C, Hagemann O. Anaesthetie mit niedrigem Frischgasflow unter <http://kath-kliniken.de/images/Abteilungen/anaesthetie/Anaesthetie-mit-niedrigem-Gasfluss.pdf> (abgerufen am 01.07.2015).
- 8 Baum JA, Sachs G, v. d. Driesch C, Stanke HG. Carbon monoxide generation in carbon dioxide absorbents. *Anesth Analg* 1995;81:144-146
- 9 Baum JA: Die Anästhetie mit niedrigem Frischgasfluß: Darstellung des Verfahrens in Frage und Antwort / von Jan Baum, - Melsungen: Bibliomed, Med. Verl.-Ges., 1993, ISBN 3-921958-90-3
- 10 Ballard K, Cheesemann W, Ripiner T, Wells S. Humidification for ventilated patients. *Intensiv. Crit. Care. Nurs.* 1992;8:2-9
- 11 Chalon J, Loew D, Malebranche J. Effect of dry anaesthetic gases on tracheobronchial epithelium. *Anesthesiology* 1972;37:338-343
- 12 Hönemann C, Hagemann O, Doll D. Inhalational anaesthesia with low fresh gas flow. *Indian J Anaesth* 2013;57:345-50

- 13 Kleemann PP. Humidity of anaesthetic gases with respect to low flow anaesthesia. *Anaesth Intensive Care*. 1994;22:396–408
- 14 Aldrete JA, Cubillos P, Sherrill D. Humidity and temperature changes during low flow and closed system anaesthesia. *Acta Anaesthesiol Scand*. 1981;25:312–4
- 15 Bilgi M, Goksu S, Mizrak A, et al. Comparison of the effects of low-flow and high-flow inhalational anaesthesia with nitrous oxide and desflurane on mucociliary activity and pulmonary function tests. *Eur J Anaesthesiol*. 2011;28(4):279–83
- 16 Aldrete JA. Closed circuit anesthesia prevents moderate hypothermia occurring in patients having extremity surgery. *Circular* 1987;4:3–4
- 17 Suttner S, Boldt J. Low-flow anaesthesia. Does it have potential pharmacoeconomic consequences? *Pharmacoeconomics*. 2000;17:585–90
- 18 Baum JA. *Low Flow Anaesthesia with Dräger Machines*. 2004
- 19 Lortat-Jacob B, Billard V, Buschke W, Servin F. Assessing the clinical or pharmacoeconomical benefit of target controlled desflurane delivery in surgical patients using the Zeus anesthesia machine. *Anaesthesia*. 2009;64(11):1229–1235
- 20 Baum JA. Low-flow anesthesia: Theory, practice, technical preconditions, advantages, and foreign gas accumulation. *J Anesth*. 1999;13:166–74
- 21 Virtue RW. Low flow anesthesia: advantages in its clinical application, cost, and ecology. In: Aldrete JA, Lowe HJ, Virtue RW, eds. *Low Flow and Closed System Anesthesia*. New York: Grune & Stratton 1979;103–109
- 22 Brody JS. New York: Reinhold; 1945. *Bioenergetics and Growth, with Special Reference to the Efficiency Complex in Domestic Animals*
- 23 Goldberg IS, Mostert JW, Lanzl EF, Lowe HJ. A pharmacokinetic model of closed-circuit inhalation anesthesia. *Ann Biomed Eng*. 1978;6:231–49
- 24 Lowe HJ, Mostert JW. Quantitative closed circuit anaesthesia. *Anaesthesia*. 1974;29:110–1
- 25 Bailey JM. The pharmacokinetics of volatile anesthetic agent elimination: a theoretical study. *J. Pharmacokinet Biopharm* 1989;17(1):109–23

- 26 Kreuer S, Bruhn J, Wilhelm W, Bouillon T. Pharmakokinetische/ pharmakodynamische Modelle für Inhalationsanästhetika, *Anaesthesist* 2007;56:538–556
- 27 Eger EI. et al., Consumption of Volatile Agents under Low Flow and Metabolic Flow Conditions, *Anesthesiology* 2004;101:A485
- 28 Baum JA. Low Flow Anaesthesia with Dräger Machines, *Dräger Medical* 2008; 15–17
- 29 Severinghaus JW. The rate of uptake of nitrous oxide in man. *J Clin Invest.* 1954;33:1183–9
- 30 Heller AR, Brückner JB. Update Inhalationsanästhesie. (2009) unter [http://www.ai-online.info/abstracts/pdf/dacAbstracts/2009/01\\_Heller-Brueckner.pdf](http://www.ai-online.info/abstracts/pdf/dacAbstracts/2009/01_Heller-Brueckner.pdf)
- 31 Nickalls RW, Mapleson WW. Age-related iso-MAC charts for isoflurane, sevoflurane and desflurane in man. *Br J Anaesth.* 2003;91(2):170–4
- 32 Eger EI. Age, minimum alveolar anesthetic concentration, and minimum alveolar anesthetic concentration-awake. *Anesthesia and Analgesia.* 2001;93:947–953
- 33 Hönemann C. Balancierte Anästhesie. In Tonner, PH, Hein L. *Pharmakotherapie in der Anästhesie und Intensivmedizin. Grundlagen und klinische Konzepte.* Springer-Verlag 2011, 291–302
- 34 Mapleson WW. Effect of age on MAC in humans: a meta-analysis. *Br J Anaesth.* 1996;76(2):179–85
- 35 Kim KM, Choi BM, Park SW et al. Pharmacokinetics and pharmacodynamics of propofol microemulsion and lipid emulsion after an intravenous bolus and variable rate infusion. *Anesthesiology.* 2007;106(5):924–34
- 36 Cand. med. Y. Dietzler, Marienhospital Vechta, Dissertationsarbeit, Data not published
- 37 Baum JA, von Bormann B, Meyer J, van Aken H. Sauerstoff als Trägergas in der klinischen Anästhesie. *Anästhesiologie und Intensivmedizin* 2004; 45: 124–135
- 38 Baum JA. The carrier gas in anaesthesia: nitrous oxide/oxygen, medical air/oxygen and pure oxygen. *Curr Opin Anaesthesiol.* 2004;17(6):513–6.



- 39 Onody P, Gil P, Hennequin M. Safety of inhalation of a 50 % nitrous oxide/oxygen premix: a prospective survey of 35.828 administrations. *Drug Saf* 2006;29:633–40
- 40 Leitlinien zur Qualitätssicherung in der Anästhesiologie der Deutschen Gesellschaft für Anästhesie- und Intensivmedizin (DGA) unter <http://www.dgai.de/publikationen/leitlinien>
- 41 Joshua D, Koch. Brief exposure to hyperoxia depletes the glial progenitor pool and impairs functional recovery after hypoxic-ischemic brain injury! *J Cereb Blood Flow Metab*. 2008 July
- 42 Greif R, Akca O, Horn EP, Kurz A, Sessler DI. Supplemental perioperative oxygen to reduce the incidence of surgical-wound infection. *N Engl J Med* 2000;342:161–167
- 43 Greif R, Laciny S, Rapf B, Hickley RS, Sessler DI. Supplemental oxygen reduces the incidence of postoperative nausea and vomiting. *Anesthesiology* 1999;91:1246–1252
- 44 Akca O, Podolski A, Eisenhuber E, Panzer O, Hetz H, Lampl K, Lachner FX, Wittmann K, Grabenwoeger F, Kurz A, Schultz AM, Negishi C, Sessler DI. Comparable postoperative pulmonary atelectasis in patients given 30 % or 80 % oxygen during and for two hours after colon resection. *Anesthesiology* 1999;91:991–998
- 45 Meier J, Habler O. Rationaler Einsatz von Sauerstoff in der Anästhesie und Intensivmedizin. *Anaesthesist* 2011;4:292–302
- 46 Habre W, Peták F. Perioperative use of oxygen: variabilities across age. *Br. J. Anaesth*. 2014;113(suppl 2):ii26–ii36
- 47 Kopp VJ. Might hyperoxia during surgical anaesthesia contribute to older patients' higher dementia risk? *Br J Psychiatry*. 2014;204(2):163
- 48 Decalmer S, O'Driscoll BR. Oxygen: friend or foe in peri-operative care? *Anaesthesia*. 2013;68(1):8–12. Epub 2012 Nov 7

### 追加の参考文献

CME 記事: Low and Minimal flow inhalation anaesthesia, Alan D. Baxter, *Canadian Journal of Anaesthesia*, 1997

## 8.2 図の一覧

図番号	説明	ページ
図 1	再呼吸システムの低流量、極低流量代謝流量麻酔の概要	08
図 2	半閉鎖式 Primus 呼吸システム内で、 $O_2/N_2O$ をキャリアガスとする低流量および極低流量麻酔	10
図 3	低流量、極低流量、代謝流量の麻酔	10
図 4	フレッシュガスおよび余剰ガスの排出後の流れに従って、患者に戻る呼気の割合	12
図 5	例として Primus/Primus IE 再呼吸システムを用いたガスフローダイアグラム	14
図 6	例として Perseus A500 再呼吸システムを用いたガスフローダイアグラム	16
図 7	例として Zeus/Zeus IE 再呼吸システムを用いたガスフローダイアグラム	17
図 8	吸気の絶対湿度の比較	21
図 9	麻酔の経過において、ドレーゲル Primus 麻酔器吸気側の Y ピースで呼吸ガス温度を測定	22
図 10	麻酔の経過において、ドレーゲル Primus 麻酔器吸気側の Y ピースで相対湿度を測定	22
図 11	麻酔の経過において、ドレーゲル Primus 麻酔器吸気側の Y ピースで絶対湿度を測定	23
図 12	異なるフレッシュガスフローと平均食道温 (0.5 対 5 L/min)	23
図 13	0.5 L/min の極低流量麻酔と標準的なフレッシュガスフロー 3 L/min とでコスト節減を比較(単位はユーロ)	25
図 14	2時間の吸入麻酔に基づく吸入麻酔薬のコスト(単位はユーロ)	25
図 15	揮発性麻酔薬の合計摂取量(呼吸濃度-望ましい状態: $0.9 \times \text{MAC}$ )	32
図 16	$O_2$ /Air をキャリアガスとする、吸入麻酔の過程での吸気と呼気のイソフルラン濃度	33
図 17	$O_2$ /Air をキャリアガスとしたときの、吸入麻酔の過程での吸気と呼気セボフルラン濃度	34

図-番号	説明	ページ
図 18	O <sub>2</sub> /Airをキャリアガスとしたときの、吸入麻酔の過程での吸気と呼気デスフルラン濃度	35
図 19	体重75kgにおける総ガス摂取率	36
図 20	MACに対する年齢の影響:	41
図 21	吸入麻酔時の呼気イソフルラン濃度の比較。O <sub>2</sub> /Airをキャリアガスとする各種フレッシュガスフロー(低流量 対極低流量)	45
図 22	吸入麻酔時の呼気セボフルラン濃度の比較。O <sub>2</sub> /Airをキャリアガスとする各種フレッシュガスフロー(低流量 対極低流量)	46
図 23	吸入麻酔時の呼気デスフルラン濃度の比較。O <sub>2</sub> /Airをキャリアガスとする各種フレッシュガスフロー(低流量 対極低流量)	47
図 24	呼吸システムにおける窒素の蓄積、体重75キログラムの患者	57
図 25	体重65キログラム、身長170センチ、44歳の患者の様々なエマルジョン(マイクロエマルジョンおよび脂肪乳剤)でのプロポフォール2 mg / kgの静脈内単回投与のシミュレーション。効果部位濃度	63
図 26	Primus データセボフルラン 最大気化器出力 8 Vol% (4 × MAC に相当)	64
図 27	Primus データデスフルラン 最大気化器出力 18 Vol% (3 × MAC に相当)	64
図 28	Zeus データセボフルラン-フレッシュガスモードでの流入 最大気化器出力 8 Vol% (4 × MAC に相当)	65
図 29	Zeus データデスフルラン-フレッシュガスモードでの流入 最大気化器出力 18 Vol% (3 × MAC に相当)	65
図 30	Primus データイソフルラン 最大気化器出力 5 Vol% (4 × MAC に相当)	66
図 31	麻酔ガスの組成、吸気濃度	72
図 32	吸入麻酔時の吸気と呼気のイソフルラン濃度。O <sub>2</sub> /Airをキャリアガスとする、フレッシュガスフローと最大気化器設定の関係	80

図-番号	説明	ページ
図 33	吸入麻酔時の吸気と呼気のセボフルラン濃度。O <sub>2</sub> /Airをキャリアガスとする、フレッシュガスフローと最大気化器設定の関係	81
図 34	吸入麻酔時の吸気と呼気のデスフルラン濃度。O <sub>2</sub> /Airをキャリアガスとする、フレッシュガスフローと最大気化器設定の関係	82
表1:	揮発性麻酔薬毎のMAC <sub>0.5</sub> 、MAC <sub>awake</sub> とMAC <sub>awake</sub> ×覚醒値	38
表2:	揮発性麻酔薬毎の薬物動態および薬力学的特性	43

## 8.3 キーワードの索引\*

あ	な
アラームモニタリング..... 48	認知発達障害..... 42
亜酸化窒素..... 36, 73ff	粘液線毛クリアランス..... 20
か	は
極低流量麻酔..... 07	肺胞分圧..... 37
筋弛緩薬..... 40	半閉鎖式..... 13
キャリアガスとしての酸素..... 58ff	半開放式..... 13
クローズドループ フィードバック制御..... 17	バランス麻酔..... 39
呼吸ガス湿度..... 20ff	非定量麻酔..... 08,15
呼吸ガス濃度..... 12,20ff	閉鎖式..... 17
コスト節約..... 24,25	ほぼ閉鎖式..... 15
さ	ま
最大気化器出力..... 86	麻酔ガスの効率性..... 26
酸素欠乏アラーム..... 56	アルファベット
酸素/亜酸化窒素をキャリアガスとして..... 68ff	Brody の公式..... 30
酸素/空気をキャリアガスとして..... 52ff	Baileyによる5コンパートメントモデル..... 31
酸素消費..... 30	Conway の公式..... 90
再呼吸システム (定義)..... 7	Lowe, 麻酔ガス摂取量の公式..... 31
時定数..... 90	MAC 値..... 37ff
ソーダライム..... 11,55,61,71ff	
た	
炭酸ガス吸収装置..... 11,49	
代謝流量麻酔..... 62,67	
低酸素血症の偶発リスク..... 57	
低流量麻酔..... 07ff	
定量麻酔..... 08,17	

\*ここに記載されているキーワードは、キーワードを含むメインページを示すものです。  
テキスト内で個々に追加されている単一の参考文献は含まれていません。



本社  
Drägerwerk AG & Co. KGaA  
Moislinger Allee 53-55  
23558 Lübeck, Germany

[www.draeger.com](http://www.draeger.com)

編集：  
Drägerwerk AG & Co. KGaA  
Moislinger Allee 53-55  
23558 Lübeck, Germany

Dràgverk & Co. Low-flow fabric flower, minimalist flower, minimalist flower, minimalist flower



