

## Technology Insights 小児換気

小児患者における全身麻酔中の換気では、麻酔ワークステーションは重要な必須要件を満たす必要があります。ドレーゲルは、術中肺保護換気における正確なニーズや要件を理解するため、世界中の臨床医や看護スタッフの皆様と緊密に連携しています。ここでは、小児の肺保護換気をサポートするドレーゲル社麻酔ワークステーションの最新の換気テクノロジーについて解説いたします。

Technology  
for Life

新生児および小児患者は、成人に比べ重度の麻酔関連の合併症を引き起こすリスクが非常に高く、それには呼吸器合併症が大きく関与しています。このことは、2017年5月のLancet Respiratory Medicineに掲載された、欧州広域で実施された大規模調査により明確に示されています<sup>1</sup>。この理由の1つとして、小児患者、特に新生児患者における生理学および既存疾患の様々な相違が挙げられます。このトピックについては、ドイツカッセル市立病院、小児麻酔科・集中治療室の主任麻酔科医師、Dr. Thomas Fischerに、臨床に関するホワイトペーパーで詳しくご説明いただいております。当社ウェブサイトの手術室における肺保護換気のページをご覧ください ([リンク](#))。

麻酔ワークステーションは、麻酔中、特に換気において小児の要件を満たす必要があります。以下の章では、小児換気における技術的要件とドレーゲルのテクノロジーがその要件をどの様にサポートするかについての背景情報をご紹介します。

### 正確な一回換気量

小児全身麻酔の換気においては、一回換気量の正確さが非常に重要となります。特に小さな小児では、設定した一回換気量からのわずかの逸脱に見えても、小児の小さな体に大きな影響を与える可能性があります。例えば、5kg児で、目標一回換気量が40mL (8mL/kg) であるとして、そこに20mL追加されると、その小児患者にとっては50%の逸脱で、その結果一回換気量は12mL/kgとなります。これは非常に大きな差で、もはや保護的換気とはみなされません。詳細については、Dr. Thomas Fischerの小児患者における全身麻酔中の換気に関するホワイトペーパーをご覧ください ([リンク](#))。ドレーゲルの麻酔装置は、精度の高い一回換気量を提供します。それには以下のテクノロジーが特に関連しています。

### フローセンサー技術

フローセンサーは、呼吸システムのガス流量を測定します。この測定値は、患者さんに供給されるガス量と患者さんによって吐き出されるガス量を計算するのに使用されます。したがって、正確な一回換気量を供給するためには、特に小児換気の小さな一回換気量を扱う場合、高い精度の流量測定が非常に重要となります。

ドレーゲルでは、熱線式流速計と呼ばれる非常に精密なフローセンサー技術を採用しています。この技術は、規定の温度に加熱されている金属線を使用し、電気インピーダンスを測定します。センサーを通過するガスフローが測定インピーダンスに影響を与える熱線を冷却します。インピーダンスの変化は、フローの変化と直接関連します。この技術は、非常に信頼性が高く正確であることが実証されており、低流量 (小さい一回換気量) であっても確実な信号を生成します。市場における、その他のテクノロジーでは、特に小児麻酔で重要な低流量において、信頼性の高い測定を行うことが非常に困難です。

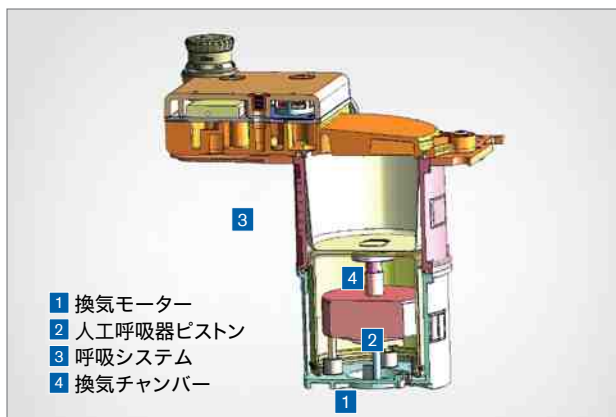
使用されているテクノロジーによっては、フローセンサーが結露の影響を受けやすい場合があり、正確な測定が妨害される恐れもあります。凝縮した水滴がセンサーに詰り、測定上の問題や完全な故障を引き起こすことも考えられます。このような測定法を採用している人工呼吸器は、正確な一回換気量を継続的に供給することが困難です。

ドレーゲルが使用している熱線式流速計技術により、このセンサーは湿度と結露に対する高い耐性を誇っています。したがって、ドレーゲルのセンサーは、他の多くのセンサーよりも非常に堅牢です。

### 一回換気量の精度とピストン式人工呼吸器

小児患者の換気においては、従圧式換気が使用推奨モードではありますが、十分な一回換気量を確実に供給するために、従量式換気も頻繁に使用されます。ピストン式人工呼吸器は、この設定された一回換気量の正確な送気に極めて適しています。ピストンの表面面積が固定されていますので、ピストンによって送気される容量は、ピストン(2)の直線的移動に直接的に関連しています。これにより、一回換気量の供給が非常に正確に行われ、万が一フローセンサーに障害が発生した場合でも、設定した容量での換気が継続されます。換気のための一回容量を設定すると、ピストンが呼吸システム(3)へ要求された容量(4)を供給するのに必要な距離だけ移動します。さらに、ピストンとモーター(1)の接続は固定されているので、ピストン(2)の位置が常に特定され、ピストンによる送気量が常に把握できます。

過剰な圧がかからないようにしながら、設定した一回換気量を確実に供給したいとすのために、ドレーゲルではもう一つの換気モードを提供しています。従量式AutoFlowは、設定した一回換気量を常に最小の圧力で従圧方式により適応します。



E-Vent人工呼吸器の略図

### コンプライアンス/フレッシュガス補正

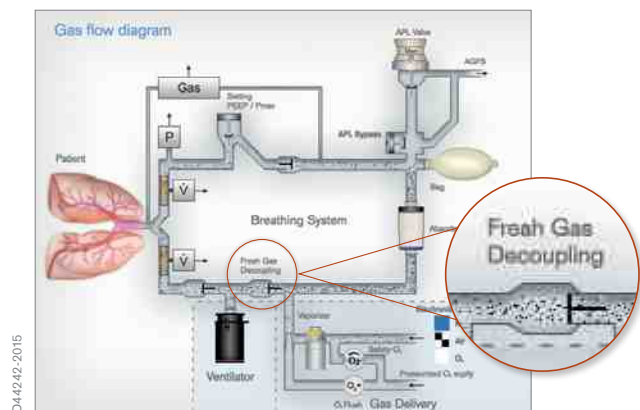
コンプライアンスとは、ホースシステムを含む麻酔装置のシステム容量の一部が圧により膨張し、実際に患者さんに供給されるべき容量を奪ってしまうことを指します。呼吸回路のコンプライアンスの影響を補正する手段が無い場合は、回路内の圧力が上昇すると、患者さんの吸入容量は減少します。ドレーゲルの人工呼吸器ユニットは、設定した容量が患者さんに確実に供給されるように、呼吸システムのコンプライアンスを補正し、呼吸ごとに十分な追加容量を送気するように設計されています。ドレーゲルの人工呼吸器は、起動セルフテスト実行中に、システムのコンプライアンスを測定します。一旦コンプライアンス要素が決定されると、圧力センサーのみを使用して、呼吸システムのコンプライアンスを補正するために必要な各呼吸での追加容量を算出します。その結果、設定通りの一回換気量が気道に供給されます。

しかしながらこのシステム容量以外にも、一回換気量に影響を与え補正を必要とするものがあります。設定されたフレッシュガス流量が一回換気量を大幅に増加させ、一回換気量の精度を損なわせる場合があり、この影響も排除する必要があります。フレッシュガス補正が古いタイプ

の装置で使用されている場合、人工呼吸器が供給する一回換気量が設定よりも多いか、または少なくなる可能性があるという欠点があります。設定した一回換気量はフレッシュガスフローと共に達成されます。しかし、フレッシュガスフロー設定を急激に変化させた場合、システムの遅延により、人工呼吸器が供給する一回換気量を装置が適応させるまでに数秒掛かります。これにより、一回換気量および吸気圧またはいずれかにピークが生じる可能性があります。この影響をより直接的かつ効果的に解決する方法は、一回換気量の供給からフレッシュガスフローを物理的に分離させることです。

### フレッシュガス ディカップリング

フレッシュガス ディカップリングは、換気への不要な影響を取り除くために、フレッシュガスフローを吸気から分離する機能です。FabiusとPrimusファミリーの麻酔装置では、バルブを利用して、フレッシュガスが呼吸システムへ流入するのを制御しています。吸気中に閉鎖されると、このバルブにより、供給される一回換気量と吸気圧へのフレッシュガスフローによる影響がなくなるため、一回換気量と吸気圧のピークは生じません。さらに、このテクノロジーは、呼吸システムの発生し得るコンプライアンス容量を低減させます。



ガスフローダイアグラムPrimus®

Perseus® A500では、フレッシュガスフローの換気への影響を防ぎ、同様の目標を達成するために、これとは少し異なるテクノロジーを利用しています。Perseus® A500のプロワー式人工呼吸器は、呼吸システムの時定数をさらに低減するために吸気フロー中にフレッシュガスフローを積極的に使用しますが、残りの吸気相では特別にデザインされた吸気調整機能によりフレッシュガスフローを物理的に分離させます。したがって、換気に及ぼすフレッシュガスフローの影響を回避することができます。

ドレーゲルの麻酔装置は、フレッシュガス ディカップリングとコンプライアンス補正の両機能を備え、システムコンプライアンスとフレッシュガスフローの悪影響を排除して、一回換気量の高い精度を実現します。

### リーク

システムリークは換気量の損失を招きます。もし補正が行われない場合、適応される一回換気量が不正確になります。現代の麻酔装置には、リークのリスクを最小限に抑え、正確な一回換気量の供給を可能にする補正機構が搭載されている必要があります。

## リークアシスタント

麻酔システムのリークを管理するためには、リークの有無およびその規模を前もって認識しておくことができる様に、装置の準備段階、すなわちシステムのセルフテスト実行中にリークを検知し通知する機能が搭載されている必要があります。

Perseus® A500では、事前テストに合格しなかった場合にリークを識別する便利なツールを提供しています。このアプリケーションが開始されると、人工呼吸器は連続フローを生成し、システムのリーク値を表示して損失量を視覚化します。このツールは、実行中のアラーム通知なしに動作します。リークを修正すると、直接的な視覚フィードバック（数値とグラフィック）が表示され、装置が正しく機能しているかが明白に分かります。



## リークを防止する呼吸システム

システムリークは補正することができますが、システムリークを最小限に抑えることで補正の必要性を減らすことが大切です。これには呼吸システムの気密性をできる限り高め、リークによるガス損失量を最小限にする必要があります。呼吸システムのパーツが少ないほど、リークの発生源は少なくなります。ドレーゲルの呼吸システムは非常に少ないパーツから構成され、接続部位数を減らして、リーク発生源を少なく抑えています。この構成は、Fabius®、Primus®ファミリーですでに採用されていますが、Perseus A500はわずか11個のパーツで構成されており、そのメリットが特に顕著です。他社の麻酔システムとは異なり、ドレーゲルの装置では、フレッシュガスのリザーバーとして機能する呼吸バッグが呼吸システムと一体となっており、十分なフレッシュガスフローが供給されているかを確認するもう一つの指標となります。フレッシュガスが不足して呼吸バッグがしぼんでいる場合は、フレッシュガスフローを増加する必要があります。



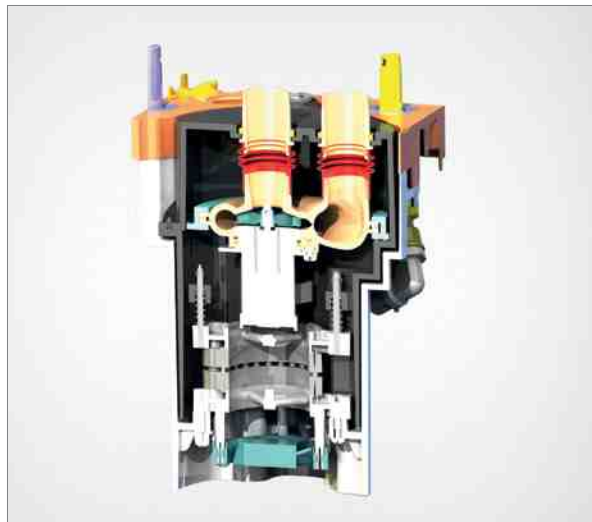
Perseus® A500の呼吸回路システムコンポーネント

## 正確な圧力

患者さんの肺、特に小児患者さんの肺を保護するためには、正確な換気圧を適応することが極めて重要です。過度の圧による過膨張や呼気終末陽圧 (PEEP) の低下が無気肺の形成を促進し、肺に損傷を与える可能性があります。Dr. Thomas Fischer が臨床に関するホワイトペーパーで指摘されているように ([リンク](#))、健常児では平均気道内圧 (MAP) を10cmH<sub>2</sub>Oまでに抑え、常に3~5cmH<sub>2</sub>OのPEEPを付加し、肺疾患を伴う小児では、PEEPを8~10cmH<sub>2</sub>Oまで上げる必要があります。このような圧を正確に供給するためには、それに適した麻酔装置の人工呼吸器が必要となります。

## 人工呼吸器テクノロジー

Perseus® A500麻酔器に搭載されているTurboVentプロワー式人工呼吸器テクノロジーは、正確な圧供給の実現に特に適しています。ヘアドライヤーの原理を使って、この作動原理を理解することができます。ヘアドライヤーは外気を吸引して加熱し、一方向へと加速させます。TurboVent人工呼吸器は加熱はされませんが、これと非常によく似た方法で動作します。一方向に回転するプロペラ (1) を通って、混合ガスが呼吸システム内のリザーバーバッグから (2を介して) 吸引・圧縮され (1,3)、その後患者さんに向かって掃気されます (4)。このように、TurboVent人工呼吸器は圧力源であるため、圧を重視したすべての換気モードでの使用に特に適しています。また、プロペラの回転速度を非常に迅速に変更することが可能なため、呼吸数の多い小児などにおいて、迅速な圧変化が円滑に行えます。



TurboVent人工呼吸器の略図

また、ドレーゲルのピストン式人工呼吸器 (E-VentおよびE-Vent plus) は精密な換気圧を供給します。電気モーターを使用した直接駆動により、ピストン式人工呼吸器は迅速かつ正確な圧供給を実現します。これは呼吸数が多く、圧力目標に素早く達成する必要がある小児の換気においても特に重要となります。



## アクティブPEEP

リーク発生は換気に重大な影響を及ぼす場合があります。正確な一回換気量を供給するために、リークテスト中に識別されたシステムリークに対応させて供給量を増加することにより一回換気量が補正されます。しかし、これによって呼気-吸気間のPEEPの低下、さらには喪失を防ぐことはできません。ドレーゲルの麻酔装置は、PEEPの設定レベルを確実に保持します。ブロー式人工呼吸器 TurboVent (Perseus® A500) は、性質上、継続的に圧を供給する性能を有します。プロペラの回転を維持することによりリークを補正し、その追加量が患者さんに送られます。ドレーゲルのピストン式人工呼吸器 E-Vent plus は、PEEP 中ピストンを上方向に継続的に移動させてリークによる損失量を補正し、確実に PEEP レベルを保持します。

## フレッシュガス ディカップリング

フレッシュガスの流入とその管理方法が換気圧に影響を与える場合があります。フレッシュガス ディカップリングやフレッシュガス補正などのメカニズムはこの影響を防ぐためのものです。詳細については、「正確な一回換気量」および「フレッシュガス ディカップリング」の章をご参照ください。

## Man/Spont mode (手動換気/自発呼吸) における圧力精度

麻酔器の手動バッグを使用して小児の換気を行う場合、システムの圧力は APL 弁で制限されます。麻酔医が換気バッグを押して圧を生成する間、APL 弁がシステム内の圧を設定値内に制限します。したがって、システム内の圧力を制限する APL 弁の精度が非常に重要となります。しかし、最近の研究で、設定された圧力上限と実際に患者さんに供給された圧に大きな違いがあることが明らかになりました。この研究で比較された 2 つの APL 弁のうちの 1 つは、設定された圧力制限から大きく逸脱し、はるかに低いまたは高い圧を供給していました。APL 弁は、線形圧力プロファイルを生成するのが理想的で、これはシステム内の圧力が設定値に正確に対応していることを意味します。ドレーゲルの APL 弁は、この線形圧力パターンを生成することが確認されているため、手動換気における過度の圧供給を確実に防止することができます。<sup>2</sup>

## 自発呼吸サポート

小児に自発呼吸をさせる場合は、自発呼吸を困難にするのではなく、サポートする麻酔装置を使用する必要があります。プレッシャーサポートなどのサポート提供には、システムがごく小さな呼吸の発現を認識することが極めて重要です。小児は一回換気量が少ないため、これには非常に感度の高いフロートリガーが要求されます。ドレーゲルの麻酔装置は高感度のフロートリガーを提供し、自発呼吸の発現を確実に検出します。さらに、Dr. Thomas Fischer が臨床に関するホワイトペーパーですでに述べているように ([リンク](#))、気道抵抗は重要なトピックであり、小さな小児においては特に重要となります。小児が自発呼吸をしやすくなるには、呼吸システムの抵抗はできるだけ低くする必要があります。

## 呼吸システムの抵抗

Perseus® A500 のようなブロー駆動式の麻酔装置では、サークルフローが呼吸システムの抵抗を減少させ、自発呼吸を促進し、呼吸仕事量を減らします。このサークルフローは、システム内を継続的に循環するわずかなフローで、これを発生させるのに必要とされる圧力は最小限であり、呼吸システムの抵抗を緩和します。これらのシステムを使用することで、吸気相や PEEP (CPAP) レベルにおいても、いつでも自発呼吸を行うことが可能になります。Fabius® や Primus® ファミリーの E-Vent および E-Vent plus ピストン駆動式人工呼吸器は、呼気中に呼気相と呼気フローを同期させ、それに応じてピストンの動きを制御して患者さんの呼気を積極的にサポートします。

## 信頼性の高いガス組成

### 優れた信頼性のガス測定 & サンプルガス リターン

麻酔装置のガス測定には、O<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>、麻酔薬の測定が含まれます。小児では、急速な不飽和化を起こす恐れがあるため、正確なガス測定、特に酸素測定の精度が極めて重要となります。酸素の測定方法に関しては、様々なテクノロジーが市場に出回っています。ドレーゲルは、磁気式および電気化学式の O<sub>2</sub> センサーテクノロジーを展開しており、両技術ともにサンプルガス組成に影響を与えない確実な酸素測定を実現します。

他の多くの機器で使用されているセンサー技術は、正確に測定を行うために大気などのいわゆる基準ガスを必要とします。これはその過程で、大気が呼吸システムからのサンプルガスと混合されていることとなります。この混合ガスの組成は、呼吸システムのガス混合とは異なるものとなります。酸素と揮発性麻酔薬の濃度は低くなり、通常呼吸器システムには存在しない窒素が追加されます。この技術を利用してサンプルガスを呼吸システムに戻す装置では、呼吸システム内のガス組成が大きく変わってしまう可能性があります。特に窒素の流入は、二酸化炭素に対するソーダライム (吸収剤) のような、専用の排除機構が用意されていない場合、望ましくない窒素の蓄積を引き起こすことがあります。しかしながら、このセンサー技術を利用している多くの装置は、呼吸システムにサンプルガスを戻さず、これに関連して別の問題、システムリークが生じます。大部分の装置では、サンプルガスはシステムから約 200 mL/分 で抽出されます。これは非常に大規模なシステムリークで、これが理由でこのような装置は、600 または 500 mL/分未満の流量で動作することができません。さらに、基準ガスとサンプルガスリターンを使用した酸素測定と低流量フレッシュガスフローを組み合わせた場合、低酸素のガス混合が生じる場合があります。したがって、A) サンプルガスはシステム内に戻され、B) サンプルガスの組成は変更されないことが重要となります。注記：上述した理由で、一部の国では、基準ガスを必要とする O<sub>2</sub> センサー技術を使用したシステムにおいて、サンプルガスをシステム内に戻すことは許可されていません。

ドレーゲルの麻酔システムでは、サンプルガスは常に呼吸システムに戻され、各ガス濃度の変更されることはありません。そのため、システム内のガス構成が変更されることがなく、システムリークを補正する必要がありません。

### システムの時定数

これは、麻酔装置が変更されたガス組成物を効果的に患者さんに供給するために要する時間を指します。麻酔医がFiO<sub>2</sub>を増加させたい場合、システム全体で実際に目標値を達成するまでに長くて数分掛かります。小児では、ガス組成の素早い変更が特に重要となるため、時定数を可能な限り小さくすることが理想的です。

呼吸システム内のガス容量は、装置の時定数に多大な影響を及ぼします。また、フレッシュガスフローが低いほど、時定数が長くなります。同じことが、容量の大きい呼吸システムにも当てはまります。ドレーゲルの麻酔装置は、呼吸システムの容量を抑え、時定数が短くなるように設計されています。さらに、当社の人工呼吸器テクノロジーはこの時定数にもプラスの影響を与えます。Perseus® A500で採用されているブローテクノロジーが循環フローをもたらし、時定数の短縮に大きく貢献します。これは小児麻酔などで一回換気量が小さい場合に特に顕著となります。

### システムの迅速な応答 / 速度 :

#### 高い呼吸回数

小さな小児ほど適切な換気のために高い換気頻度が要求されます。これにより、吸気時間が非常に短くなります。特に、エアトラップを回避するために最短呼気時間の0.4秒を提供する必要がある場合、吸気時間はかなり短くなります。この短い吸気時間内に設定された一回換気量を提供するためには、麻酔用人工呼吸器は、与えられた短い時間内で設定された一回換気量を適用する速い吸気フローを供給する必要があります。ドレーゲルの人工呼吸器はすべて、高い呼吸回数に対応する速い吸気フローを提供する性能を備えています。

その中でも、TurboVentブロー式人工呼吸器は、プロペラの回転速度を急速に変更することが可能なため、最速の吸気フローを迅速に供給するのに特に適した設計となっています。このテクノロジーにより、大きな換気量を非常に短い時間で移動させることが可能です。

### 時定数

小児では、SaO<sub>2</sub>の低下を抑え、酸素化を改善するためにFiO<sub>2</sub>を上げる場合など、ガス組成の素早い変更が必要となる場合があります。そのため、ガス組成の変化に対するシステムの応答能力が非常に重要となります。ドレーゲルの呼吸システムは、短い時定数を実現するように特別に設計されています。詳細については、「信頼性の高いガス組成」の章をご参照ください。

### 適切な使用準備

#### 患者タイプ & 換気設定プリセット

麻酔を行う環境において、徹底した準備は何よりも重要となります。小児が麻酔の導入に到達した後は、時間がほとんどありません。特に一度麻酔が導入されると、臨床上有意な酸素飽和度低下（無呼吸耐性）時間は90秒まで短くなり得ます。そのため、麻酔装置による適切な機械換気に素早く変更する必要があります。これを円滑に行うためには、麻酔導入の前にすべての準備と設定を完了させておく必要があります。ドレーゲルの麻酔装置は、小児患者（小児および新生児）などの特定の患者タイプに合わせてカスタマイズできるプリセットを提供し、このプロセスを容易にします。適切な患者タイプを選択すると、関連する設定とアラームリミットが自動的に適応されます。ほとんどの場合、特定の患者さんに対する手動調整はほぼ必要ありません。

#### システム死腔量の最小化

死腔量を最小限に抑えることの重要性に関しては、Dr. Thomas Fischer の臨床に関するホワイトペーパーで詳しく説明されています ([リンク](#))。生理学的死腔量は、一回換気量のおよそ1/3と推定されています。したがって、Yピースと患者さんとの間のシステムの死腔をできる限り少なくすることが重要であり、適切なアクセサリを選択し、システム内の配置を最適化する必要があります。HMEフィルターなどのフィルター類は、装置近位に取り付け、特に小さい小児の場合、患者さんの近くに取り付けるのは避けます。どうしても患者さんに近い位置に取り付ける必要がある場合は、小さいフィルターを選択する必要があります。ドレーゲルでは様々な小児および新生児用フィルター、ならびに死腔の最適化に有効な各種アクセサリを取り揃えております。ここをクリックして、小児に特に適したドレーゲル麻酔装置用アクセサリの詳細をご覧ください。

## 参考資料

1. Habre W, Disma N, Virag K, Becke K, Hansen TG, Jöhr M, Leva B, Morton NS, Vermeulen PM, Zielinska M, Boda K, Veyckemans F; Incidence of severe critical events in paediatric anaesthesia (APRICOT): a prospective multicentre observational study in 261 hospitals in Europe; *Lancet Respir Med.* 2017 May;5(5):412-425. doi: 10.1016/S2213-2600(17)30116-9
2. Spinney S, Sprigge KA, Lawson T, Flow-pressure characteristics of an Intersurgical adjustable pressure-limiting valve; *Anaesthesia*, 2017 Apr;72(4):539-540. doi: 10.1111/anae.13846.

全製品、機能、またはサービスがすべての国で販売されているとは限りません。  
記載された商標は、一部の国でのみ登録されており、この資料が公開される国で登録されているとは限りません。  
現在の状況については、[www.draeger.com/trademarks](http://www.draeger.com/trademarks) でご覧ください。

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

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

**製造業者：**  
Drägerwerk AG & Co. KGaA  
Moislinger Allee 53-55  
23542 Lübeck, Germany

写真と実物が一部異なる場合があります。  
あらかじめご了承ください。

**製造販売業者**  
ドレーゲル・メディカル  
ジャパン株式会社  
お問い合わせ、ご用命は  
カスタマーサービスへ  
Tel 03-6447-7222  
Fax 03-6447-7220

**本社**  
〒141-0021  
東京都品川区上大崎2-13-17  
目黒東急ビル 4F

**札幌サービスセンター**  
〒060-0007  
北海道札幌市中央区北7条西  
13-9-1  
塚本ビル7号館

**仙台サービスセンター**  
〒981-3133  
宮城県仙台市泉区泉中央1-14-1  
インテレクト21ビル4F

**東京サービスセンター**  
〒135-0047  
東京都江東区富岡2-4-10

**名古屋サービスセンター**  
〒460-0008  
愛知県名古屋市中区栄2-12-12  
アーク栄白川パークビル7F

**大阪サービスセンター**  
〒564-0062  
大阪府吹田市垂水町3-3-17

**広島サービスセンター**  
〒733-0002  
広島県広島市西区楠木町2-2-27

**福岡サービスセンター**  
〒812-0016  
福岡県福岡市博多区博多駅南  
2-12-3  
トークン福岡ビル1F

本件に関するお問合せ：  
[www.draeger.com/  
renrakusaki](http://www.draeger.com/renrakusaki)

