手術室での肺保護換気

機械的換気は全身麻酔中に欠かすことができない呼吸を補助します。しかし、機械的換気は、主に無気肺が原因で酸素化およびガス交換の障害を助長する恐れがあります。本稿では、さまざまな意見を取り上げて、全身麻酔中の肺虚脱を予防するアプローチを考察します。最後に、ワークフローを単純化し、連続したモニタリングを通して可視性を高めるほか、高度なデータ分析によって患者ケアの改善を手助けするべく設計された当社の技術的ソリューションを紹介します。

全身麻酔中の無気肺

全世界で毎年 2 億人を超える患者が全身麻酔を受け、機械的換気により実施されています [1-4]。全体的に、全身麻酔は外科手術を可能にする有効な方法であり、全身麻酔中は機械的換気が不可欠です。しかし、機械的換気には、主に無気肺（肺全体または肺葉の部分的または完全な虚脱）が原因で酸素化およびガス交換の障害を助長する恐れもあります [5,6]。無気肺は麻酔導入から数分以内に起こると推定され、患者の 90%に発症し、術後数日に及ぶことがあるなど、手術室で最もよくみられる合併症のひとつとなっています [4-6]。全身麻酔中の無気肺の発症に寄与すると考えられる 3 つの生理学的機序には、肺組織による圧迫、肺胞気での吸収およびサーファクタント機能の障害があります [5,6]。

- **圧迫性無気肺**は、横隔膜が頭側に変位して弛緩した時に起こり、横隔膜が胸腔と腹腔との間の差圧を維持する効果を減少させ、その結果、壁内外圧差が減少し、その後肺胞が膨張して虚脱すると考えられています。
- **吸収性無気肺**は、肺内の大量の窒素が酸素に置き換えられた時に起こり、この酸素が血中に吸収され、肺胞の容積を減少させて肺胞虚脱を引き起こすと考えられています。
- **サーファクタント喪失性無気肺**は、麻酔への曝露中に広く肺胞表面を覆っている肺サーファクタントに機能不全が生じた時に起こり、麻酔への曝露によってサーファクタントの安定化機能が抑制され、肺胞虚脱を引き起こすと考えられています。

ここに挙げた 3 つの生理学的機序のほか、以下の手術因子と患者因子（網羅的な一覧ではない）が無気肺の形成に影響を及ぼす可能性があります。

手術因子	患者因子
胸部または腹部の手術	年齢
体位	BMI 高値
冠動脈バイパス術	喫煙
腹腔内圧の増加	妊娠

全身麻酔中の無気肺は術後肺合併症（PPCs）の発症を助長します。PPCs の発症率は 1～23%未満と報告されていますが [2]、肺機能が損なわれると以下の数字が増加することが示唆されています。

(a) 短期および長期の死亡率
(b) 罹病率
(c) 医療費 [2]

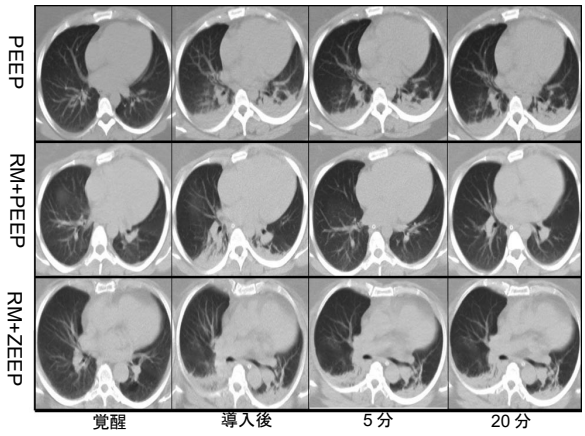
術後の肺および心臓の合併症は術後肺合併症（PPCs）のみの場合、消化器手術を受けた患者の死亡率は 11.9%と高く、さらに、術後 ICU 入室期間が 4.5 日から 7.1 日に延びると、それに伴ってコストが 25,498 ドル増加します [7]。

術中肺保護換気：臨床的エビデンスの要約

全身麻酔中の無気肺は健康と財政への影響を伴う臨床的問題であるとするコンセンサスが存在する一方で、全身麻酔中の肺虚脱を予防する方法をめぐっては多くの考えや意見があります。

肺保護換気戦略は救命医療で採用されており、術後アウトカムの改善を目指して手術室に応用することができます。増えつつあるエビデンスにより、低い 1 回換気量（VT）で、適度な PEEP を設定し、リクルートメント手技（RM）を用いる予防的な肺保護換気（LPV）戦略では、PPCs の発症を減少させ、術中の肺保護が得られることが報告されています [1,2,4-6]。このことは生理学的および臨床的な術後アウトカムの改善にもつながる可能性があります。しかし、このような戦略の役割と機能だけを取ってみても、未だ十分に理解されているとは言えません。Reinius らは、病的肥満患者では、PEEP またはリクルートメント手技のみ適用しても無気肺を減少させる効果はなかったと報告しています [8]。

ところが、一部の症例では、リクルートメント手技に続いて、PEEP を適用すると肺の無気肺領域が開通し、動脈血酸素化が改善したほか、呼吸器系のコンプライアンスが増加したという報告もあります [8]。



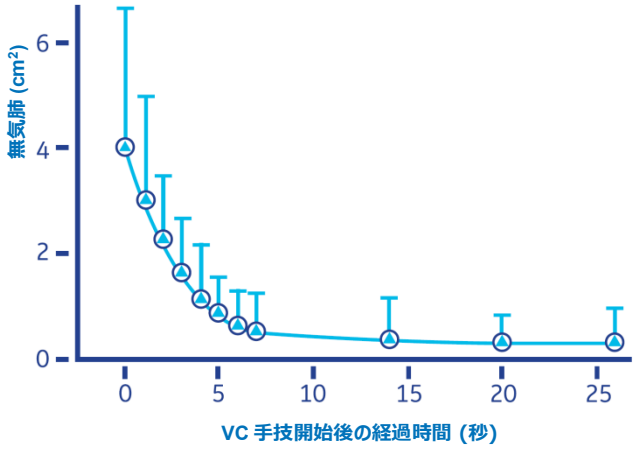
4 つの時点（覚醒、導入後、導入後 5 分および 20 分）で 3 群（PEEP、RM+PEEP および RM+ZEEP）の各々にみられた代表的な肺 CT 画像。ZEEP = 呼気終末 0 圧 [8]

肺リクルートメント手技

リクルートメント手技（RM）は、経肺圧を一時的に増加させることにより、虚脱した肺胞を開通させることを意図した手技です。以下のセクションでは、術中の肺保護換気戦略の一環として、シングルステップおよびマルチステップのリクルートメントに注目します。

Vital Capacity：シングルステップリクルートメント手技

一定時間、設定された圧を加え保持する方法として、呼吸バッグ加圧または Vital Capacity があり、一部の症例に有効であることが裏づけられています。脳神経外科または眼科手術における術中患者では、健康な成人の肺を 40 cm H_2O まで膨張させると、Vital Capacity (VC)手技の開始から 7～8 秒以内に、虚脱した肺組織を効率的に再膨張させることができたという報告があります [9]。下の図表は、麻酔導入から 15 分後以降に適用し、26 秒間保持した「バッグ加圧」の前後の動脈血ガス測定結果を併せた、無気肺を示したものです [9]。



VC 手技の前後の動脈血の分析

	前	後	*P*
pH	7.44 (0.03)	7.44 (0.04)	0.20
Pa_{co2} (kpa)	4.80 (0.6)	4.70 (0.7)	0.30
Pa_{o2} (kpa)	17.2 (4.0)	22.2 (6.0)	.013
Sa_{o2} (%)	98.3 (0.9)	98.7 (0.5)	0.10
重炭酸イオン (mEq/L)	24.6 (1.2)	24.8 (1.1)	0.50
BE (mEq/L)	0.10 (1.4)	0.20 (1.1)	0.90

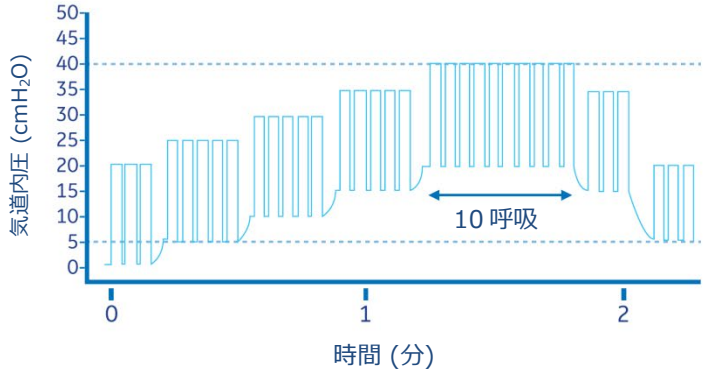
全ての患者に適した単一のアプローチはありませんが、最近のメタアナリシスでは以下の知見が得られています。

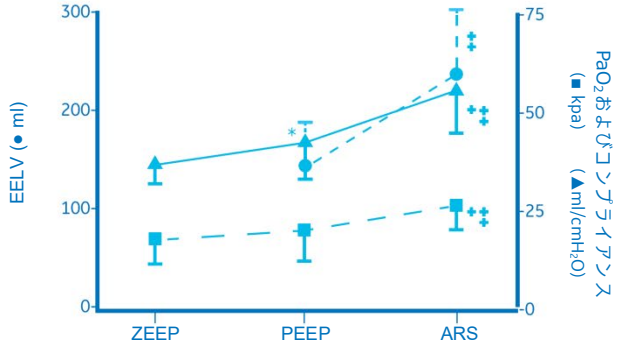
1. **FiO_2 を減少させても（耐容性を示す患者集団が対象）、無気肺の形成を抑えつつ十分な酸素化を得ることができる。**
2. **VC 手技（+40 cm H_2O を 15 秒間）を PEEP（+10 cm H_2O）と組み合わせれば、無気肺形成および術後合併症の予防に有効である。**

その他、Vital Capacity による肺リクルートメント戦略が有益であることも裏づけられています。Intraoperative Protective Ventilation（IMPROVE）試験の結果からは、肺保護的換気戦略（この場合、VT 6～8 ml/kg［予測体重］、PEEP 6～8 cm H_2O としてリクルートメント手技 30 cm H_2O を 30 秒間、30 分に 1 回の頻度で反復）により、症例によっては術後合併症が減少することが報告されています [10]。

Cycling：マルチステップリクルートメント手技

シングルステップリクルートメント手技のほかマルチステップ（またはステップワイズ）リクルートメント手技もまた有益と思われます。駆動圧および PEEP（または両方）を漸増させるリクルートメント手技はステップワイズ RM ととして知られています。このような RM 手技では肺内外圧差をさらに段階的に増加させることが可能です。下腹部の開腹手術が施行された患者では、従圧式換気にステップワイズ RM 戦略を採用することにより（換気回数 15 回、I／E 比 1:1、PEEP を 0 cm H_2O から 20 cm H_2O まで 5 cm H_2O ずつ漸増）、動脈血酸素化、呼気肺気量および呼吸コンプライアンスの増加につながったことが報告されています [11]。この肺胞リクルートメント戦略を以下に要約します。データが示すように、ステップワイズ RM 実施後には死腔が減少し、CO_2 排出が改善したほか患者の換気効率が改善したことが報告されています [11]。





EELV = 終末呼気肺気量位

ARS = 肺胞リクルートメント戦略

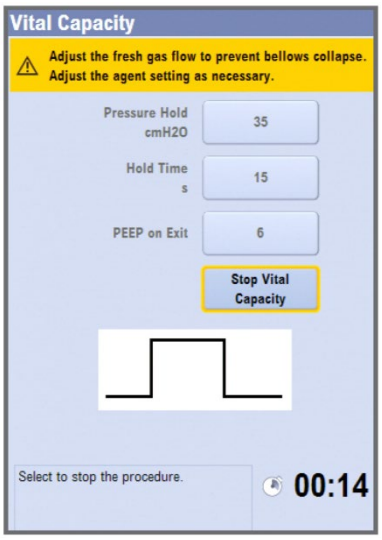
GE Healthcare による肺保護技術ソリューション

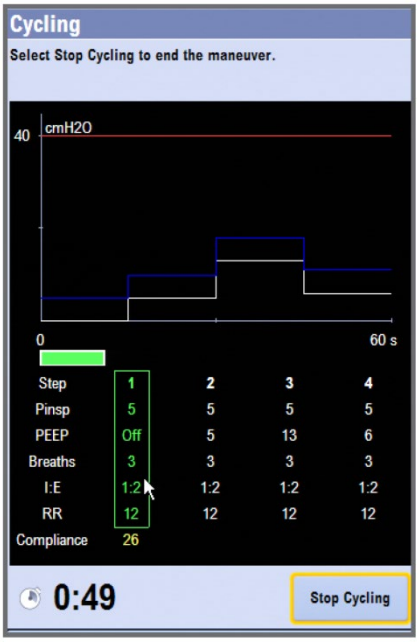
自動化された肺リクルートメント手技：患者ケアを助けるシンプルなワークフロー

GE Healthcare の麻酔システムは、ワークフローをシンプルにして、臨床医がより効率的な患者ケアを提供するのをサポートするよう設計されています。GE Anesthesia Aisys CS^2、Avance CS^2 および Carestation 600 の各シリーズのソフトウェアでは、肺リクルートメント手技が自動化されているものがあります。いずれも Procedures キーの中で Vital Capacity および Cycling と呼ばれています。このように、自動化された機能により、正確かつ効率的に肺リクルートメント手技を実施することができます。

Vital Capacity

Vital Capacity 機能は用手的なバッグの「加圧と保持（squeeze and hold）」を自動化するもので、ベンチレータの設定を何度も変更することなく、1 回の加圧呼吸をシンプルに実施する方法を提供します。また、PEEP on Exit 設定は、Vital Capacity 手技の終了時にベンチレータの PEEP 設定を自動的に変更することが可能です。



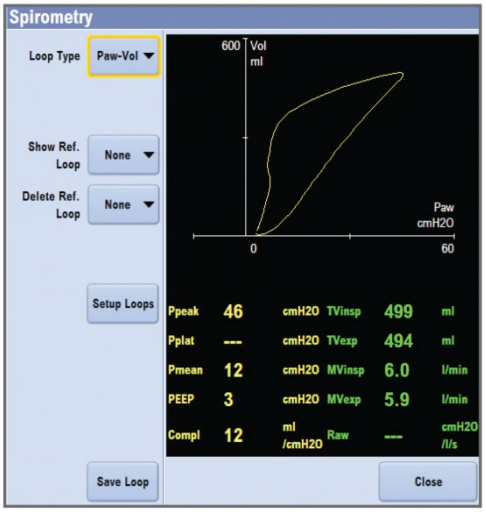


Cycling

Cycling はマルチステップリクルートメント手技を自動化するものです。自動化されたプログラム可能な機能であり、機械換気中に PEEP レベルを増減することができます。Cycling は、ベンチレータの設定を何度も変更することなく、換気時に加圧呼吸をフレキシブルに実施する方法を提供します。プロファイルでは最大 7 つのステップ(Step)が設定でき、4 つのサイクリングプロファイルが用意されています。各プロファイルのデフォルトのステップおよび換気設定は Super User によってあらかじめ設定することもできます。また、各ステップの換気設定は Cycling 開始前にユーザーが変更できます。Aisys CS^2 ソフトウェア(ver.11)では、自動化された Cycling のリアルタイムの有効性を示すコンプライアンス測定結果の推移と併せて、左図のように実行中のステップが緑色のボックス内に表示されます。

Patient Spirometry：麻酔中のリクルートメントの有効性を評価する際の基本的なパラメータとなる肺コンプライアンス

肺コンプライアンスは呼吸器系の伸展性を反映するもので、肺を一定量膨張させるのに必要な圧差と定義されます。動肺コンプライアンスは VT を PIP と PEEP の差で割って算出します：動肺コンプライアンス＝VT／(PIP - PEEP) 。連続的な動的数値として、呼吸器の変化を追跡し、それに応じてベンチレータの設定を調節するための容易なツールとなります。



肺胞リクルートメント手技を実施した直後に肺コンプライアンスの増加がみられれば無気肺の減少が反映されていると考えられることから、換気と血流比の改善によって PaO_2 の増加をもたらすことが推測できます。

Patient Spirometry(スパイロメトリ)は Aisys CS², Avance CS² および Carestation 600 シリーズの特徴で、患者の気道で呼吸毎に気道内圧(Paw)、流量(Flow)、容量(Vol)、コンプライアンス(C)そして気道抵抗*を測定します。圧と容量(P-V)、流量と容量(F-V)、そして圧と流量(P-F)の動的な相互関係がループとして表示されます。

*CARESCAPE 呼吸ガスモジュールが必要です

左の図は異なる PEEP 設定とリクルートメント手技がコンプライアンスに与える影響について表しています。保存されたループ（白）はコンプライアンスの低下を示しています。PEEP 設定を 5 cmH_2O に上げることによってループ形状は変化し、肺コンプライアンス（黄）が明らかに改善しているのが解ります。

Cycling では、各 PEEP レベルで肺動コンプライアンス値が表示されるため、特定の患者において、リクルートメントが施行された時の最適な PEEP レベルを知ることができます。

脈圧変動（dPP）と収縮期圧変動（SPV）：患者の血行動態安定性の連続モニタリング

陽圧換気を行うと胸腔に血圧変化が引き起こされます。血圧は吸気相では上昇し、呼気相では低下します。このような変化の大きさは患者の体液の状態に左右されます。体液量が減少している患者では、体液量が正常または輸液量過多の患者よりも振幅が高くなる現象はよく知られています。

Aisys CS²、Avance CS² および Carestation 600 シリーズと併せて GE Healthcare の CARESCAPE 患者モニター（B850、B650 および B450）に搭載されている Pulse Pressure Variation（脈圧変動＝dPP）および Systolic Pressure Variation（収縮期圧変動＝SPV）の各ツールを使用することにより、個々の患者に適した肺保護戦略を効果的に実施することができます。dPP と SPV は、PEEP およびリクルートメント手技(RM)によって誘発される血行動態の不安定を予測するのに有用と思われる臨床的判断ツールです。

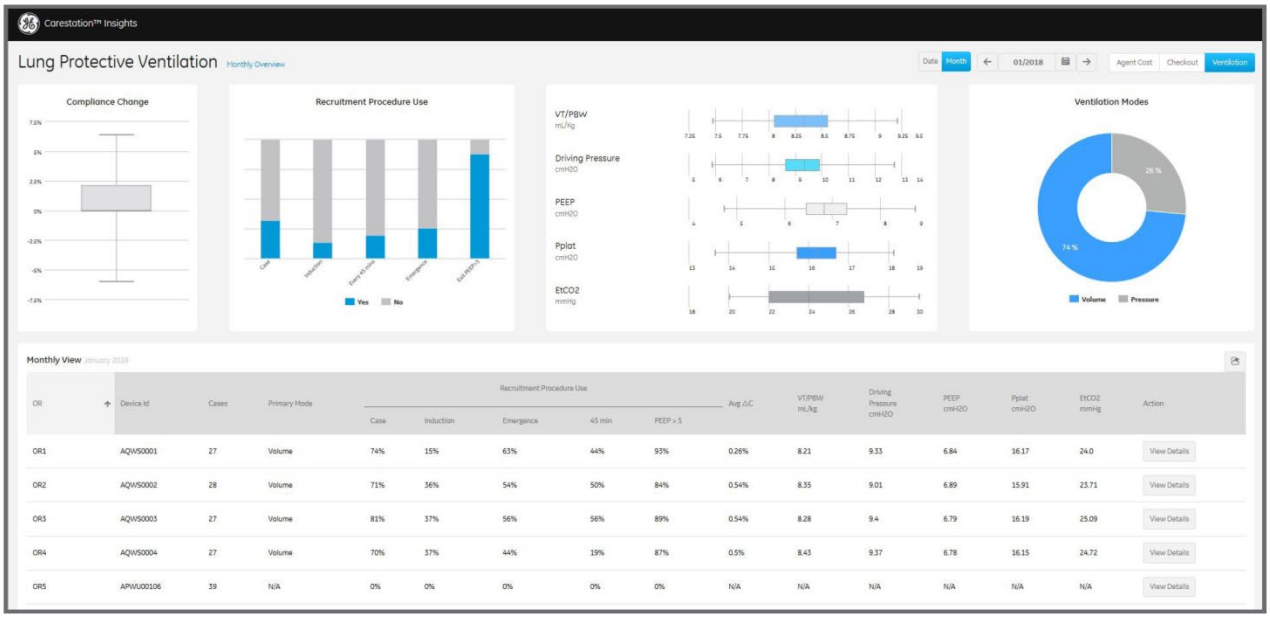
胸腔内圧の上昇は右室の後負荷を上昇させ、胸腔内の静脈を圧迫し、心拍出量を低下させる可能性があります。肺はまた、心臓に圧迫作用を及ぼし心臓のコンプライアンスを損なう可能性もあります。心負荷の変動は dPP と SPV に反映されると考えられることから、dPP と SPV の値を利用することにより、肺リクルートメントが血行動態に及ぼす影響に関する意思決定の支援となるでしょう。

Carestation Insights：換気と lung response の可視性を向上させる麻酔データ分析

Carestation Insights は、アウトカムを改善させるためにデータを可視化し、臨床医が課題解決に結びつけた意思決定ができるよう、設計されたクラウドベースのデータ分析アプリケーションです。換気やガスに関する数値データ、アラーム、エラーコード、機器の状態をカバーする 300 以上のデータポイントを分析します。

Lung Protective Ventilation（肺保護換気）アプリケーションは、接続されたすべての GE 麻酔装置について換気設定とそのレスポンスをトラックします。病院が取り組んでいる肺保護換気のプロトコルを支援して臨床アウトカムの改善に導くほか、術後合肺併症を減少させるためのデータが得られます。

このアプリケーションは実施した肺保護換気戦略に基づくプロトコルとその効果を可視化し、その後の肺保護戦略に改善をもたらします。主要な換気設定と測定パラメータの連続したデータをトラッキングするメカニズムを備えており、診療科部門や手術部門の双方において肺保護換気(LPV)のプロトコルに沿った実施状況をモニタすることができます。加えて、患者肺コンプライアンスの変化への意識向上につながり、換気設定と術中の患者アウトカムとの因果関係に対する肺保護換気(LPV)の影響について臨床医の教育にも役立ちます。



GE Healthcare は肺保護換気戦略について各々の観点でモニタリングを行い、そして行動に移していくための包括的なソリューションを提供します。どの GE ソリューションが最適なのか確認するには、お近くの GE Healthcare 代理店までお問い合わせいただくか、ウェブサイト **gehealthcare.co.jp** をご覧ください。

参考文献

1. *E. Futier, E. Marret, S. Jaber, Perioperative positive pressure ntilation: an integrated approach to improve pulmonary care. Anesthesiology 121, 400-408 (2014).*

2. *A. Miskovic, A. B. Lumb, Postoperative pulmonary complications. Br J Anaesth 118, 317-334 (2017).*

3. *N. M. Goldenberg, B. E. Steinberg, W. L. Lee, D. N. Wijeysundera, B. P. Kavanagh, Lung-protective ventilation in the operating room: time to implement? Anesthesiology 121, 184-188 (2014).*

4. *A. Güldner et al., Intraoperative protective mechanical ventilation for prevention of postoperative pulmonary complications: a comprehensive review of the role of tidal volume, positive end-expiratory pressure, and lung recruitment maneuvers. Anesthesiology 123, 692-713 (2015).*

5. *M. Duggan, B. P. Kavanagh, Pulmonary atelectasis: a pathogenic perioperative entity. Anesthesiology 102, 838-854 (2005).*

6. *L. Magnusson, D. R. Spahn, New concepts of atelectasis during general anaesthesia. Br J Anaesth 91, 61-72 (2003).*

7. *L. A. Fleisher, W. T. Linde-Zwirble, Incidence, outcome, and attributable resource use associated with pulmonary and cardiac complications after major small and large bowel procedures. Perioper Med (Lond) 3, 7 (2014).*

8. *H. Reinius et al., Prevention of atelectasis in morbidly obese patients during general anesthesia and paralysis: a computerized tomography study. Anesthesiology 111, 979-987 (2009).*

9. *H. U. Rothen et al., Dynamics of re-expansion of atelectasis during general anaesthesia. Br J Anaesth 82, 551-556 (1999).*

10. *E. Futier et al., A trial of intraoperative low-tidal-volume ventilation in abdominal surgery. N Engl J Med 369, 428-437 (2013).*

11. *G. Tusman, S. H. Böhm, F. Suarez-Sipmann, E. Turchetto, Alveolar recruitment improves ventilatory efficiency of the lungs during anesthesia. Can J Anaesth 51, 723-727 (2004).*

*本資料に掲載されている内容は、出典の参考文献を元にした情報であり、仕様値として保証するものではありません。

販売名：エイシス
承認番号：21900BZX00741000
販売名：アバンス CS2
承認番号：22500BZX00349000
販売名：Carestation 600 シリーズ
承認番号：22700BZX00422000
販売名：CARESCAPE ベッドサイドモニタ B450
認証番号：22500BZX00490000
販売名：CARESCAPE™ ベッドサイドモニタ B650
認証番号：22300BZX00157000
販売名：CARESCAPE™ ベッドサイドモニタ B850
認証番号：22300BZX00419000

© 2018 General Electric Company – 無断複写・転載を禁じます。GE Healthcare は予告なく、義務を負うことなく、いつでも、の文書に示された仕様および特徴に変更を加えたり、記載された製品の製造販売を中止したりする権利を有します。 最新の情報についてはお近くの GE Healthcare 代理店までお問い合わせください。GE Medical Systems, Inc.は GE Healthcare として営業しています。GE Healthcare は General Electric Company のグループ企業です。GE、GE Monogram、Aisys、Avance および Carestation は General Electric Company の商標です。

JB82760JA