

食道内圧バルーン空気量の簡便な較正法 (呼吸同調持続注入法：CAISR法)の開発

宇佐見 直¹⁾・則末泰博²⁾

KEY WORDS 食道内圧測定バルーン, シリンジポンプ, 呼吸同調持続注入, 急性呼吸不全患者, オクリュージョンテスト

要旨

本研究は我々が発案した呼吸同調持続注入法 (continuous air infusion synchronizing with respiration: CAISR法) を用いた、食道内圧バルーンへの空気充填量の妥当性を検証することである。この方法はMojoliらの方法のように間欠的に空気を充填し、何回も換気を停止して圧測定するのではなく、シリンジポンプを用いて1呼吸周期中に一定量の空気を充填しながら16回の呼吸中に圧測定し適切な空気充填量を決定する、より簡便な方法である。急性呼吸不全で経肺圧測定が必要と判断された人工呼吸管理中の患者36名を対象とし検証を行った。シリンジポンプは1呼吸ごとに0.5mLの空気が充填されるように流量を設定し、16呼吸カウント中に食道バルーンに空気を充填した。人工呼吸器のグラフィックから呼吸ごとの吸気終末および呼気終末の気道内圧 (airway pressure: Paw) と食道内圧 (esophageal pressure: Pes) を記録した。最適なバルーンの空気充填量の中央値は3.5mL (3.0~4.0mL)、気道閉塞試験における Δ Pawと Δ Pesの一致率の中央値は0.86 (0.83~0.89) であった。食道内圧バルーンへ充填する空気量を調整するうえで、CAISR法の臨床使用における妥当性が示された。

I はじめに

急性呼吸不全の人工呼吸管理において、適切なPEEP、許容できる気道内圧 (airway pressure: Paw) の上限、許容できる Δ P (delta pressure)などを設定することが重要であり、そのためには胸郭と肺のエラスタンス比を求めることのできる食道内圧 (esophageal pressure: Pes) 測定は有用である¹⁾。臨床においてPes測定が普及しにくい要因として、バルーンカテーテルの挿入、バルーンへの空気充填、バルーン留置位置の確認などに手間を要すること、測定されたPesの正確性に確信を持ちづらいこと、Pesから経肺圧を算出する方法が複数あることなどが考えられる。

Pesを胸腔内圧の代用として用いるためには、胸腔内圧がPesに正確に伝達されているという前提条件が必要

である²⁾。Pesの測定は、不適切なバルーン充填量により過小評価されたり、過大評価されたりすることがある³⁾。適切な充填量についてはカテーテルによっても異なるが、患者個々によっても異なってくると考えられる。バルーンおよび食道壁のエラスタンスが影響しないように、バルーンが食道内を満たしつつ圧迫されないギリギリの空気量 (unstressed volume) に調整する必要がある⁴⁾。

食道内圧バルーン空気量について、現在妥当性が確認されている方法にMojoli法^{3,4)}がある。バルーン空気量を0~3mLまで0.5mLずつ、3~8mLまで1mLずつ容量を増やしていきながら、吸気ポーズと呼気ポーズを各5秒間行い、静止時の吸気終末食道内圧 (end inspiratory esophageal pressure: PesEI) および呼気終末食道内圧 (end expiratory esophageal pressure: PesEE) を記録する。バルーン充填量を目標値に到達させるためには、各ステップにおいて毎回陰圧をかけてバルーンを虚脱させた後に、空気を10mL充填して完全に膨張させ、目標容量になるようにバルーンを脱気する。これを繰り返し

1) 東京ベイ浦安市川医療センター 臨床工学室

2) 同 救急集中治療科 集中治療部門

† 責任著者

[受付日: 2024年1月18日 採択日: 2024年7月19日]

食道内圧バルーン空気量の簡便な較正法（呼吸同調持続注入法：CAISR法）の開発

行い、吸気と呼気におけるバルーン充填量とPesの圧容量(PV)曲線を求める。この呼気終末PV曲線上で直線的な変化をする区間の下限、上限が検出され、その下限を最小充填量、上限を最大充填量（それぞれ V_{max} と V_{min} ）とする。この V_{max} と V_{min} の間の範囲は適切なバルーン充填量になり、 V_{min} 未満は充填不足を示し、 V_{max} 以上では過膨張を示す。この範囲において、吸気終末と呼気終末の圧力差(PesEI-PesEE)が最大となる最小のバルーン充填量が最適な充填量(V_{best})と特定する(図1)。

さらに、求められた充填量が適正かどうかを検証するために気道閉塞試験を行う必要がある。患者の自発呼吸がない状態で、呼気ポーズ中に患者の胸郭を圧迫しながら、PesとPawの変化（それぞれ ΔPes と ΔPaw ）を同時に測定し、 $\Delta Pes/\Delta Paw$ が0.8~1.2であればバルーンは適切に配置され、適切な充填量であることを確認することができる。

以上のように、このMojoli法は筋弛緩を必要とすること、膨大な手間と時間を要すること、そして患者の換気状態に影響を与えることより、急性呼吸促進症候群(acute respiratory distress syndrome: ARDS)患者に対して日常診療で用いることは困難である。そこで我々は、ARDS患者においても安全に施行することが可能であり、臨床使用に耐えうる精度を持つ空気充填量の決定法の開発を目標とし、Mojoli法の簡易版である、呼吸同調持続注入法(continuous air infusion synchronizing with respiration: CAISR法)を提案した。CAISR法には2つの特徴がある。1つは、シリンジポンプを用いて持続的にバルーンに空気を充填すること。2つ目は、換気を止めずに設定した頻度で換気を行いながら空気を充填し、各呼吸でどれぐらいの空気が充填されたかがわかるように呼吸回数と空気充填速度を同調させることである。Mojoli法のように、食道バルーンを0~8mLまでの適切な充填範囲内で、シリンジポンプの流量を1呼吸ごとに0.5mLの空気が充填できるように呼吸回数×30mL/時と設定した。 V_{min} と V_{max} の間の範囲はPesで胸腔内圧の変化を代用するための適切なバルーン充填量の範囲に対応すると考えられ、 V_{min} 未満の体積は充填不足を示し V_{max} を超える体積は充填過剰を示すと予想される。 ΔPes が最大となる呼吸カウント(respiratory rate count: RRcount)の最小値を確認し V_{best} とした。この患者では V_{best} が7呼吸目であれば3.5mLというように、RRcountの1/2が最適なバルーン充填量(mL)に対応する(図2)。

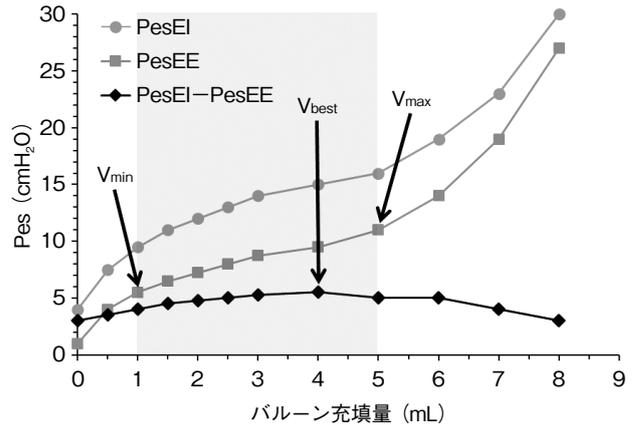


図1 Mojoli法における吸気と呼気におけるバルーン充填量とPesの圧容量(PV)曲線

バルーンへ空気を充填していき、吸気と呼気におけるバルーン充填量とPesの圧容量(PV)曲線を求める。呼気終末PV曲線上で直線的な変化をする区間の下限を最小充填量: V_{min} 、上限を最大充填量: V_{max} が検出され、この範囲(グレー部分)が適切なバルーン充填量となる。この範囲において、吸気終末と呼気終末の圧力差(PesEI-PesEE)が最大となる、最小のバルーン充填量を最適な充填量(V_{best})と特定する。
吸気終末食道内圧(End inspiratory esophageal pressure: PesEI)、呼気終末食道内圧(End expiratory esophageal pressure: PesEE)

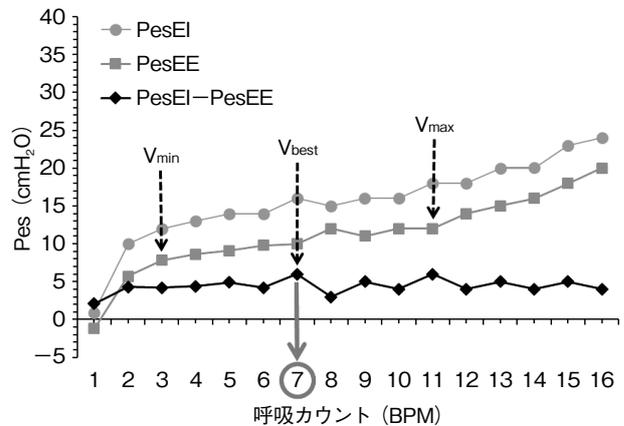


図2 CAISR法における V_{min} 、 V_{max} 、 V_{best} の決定

バルーンへ空気を充填する際に呼吸と食道バルーン充填量を同調させており、1呼吸ごとに0.5mLの空気が充填され、呼吸カウントとPesの圧容量(PV)曲線が求まる。呼気終末のPV曲線上で直線的な変化をする区間の下限が V_{min} 、上限が V_{max} として検出される。この範囲において、吸気終末と呼気終末の圧力差(PesEI-PesEE)が最大となる呼吸カウントの最小値が V_{best} となり、その呼吸カウントからバルーン空気充填量を算出した。
吸気終末食道内圧(End inspiratory esophageal pressure: PesEI)、呼気終末食道内圧(End expiratory esophageal pressure: PesEE)

II 目的

本研究の目的は、CAISR法によって決定された食道内圧バルーンへの空気充填量の妥当性を検証することである。

Ⅲ 対象

当院にて2020年12月2日から2023年3月6日の期間において急性呼吸不全で吸気圧およびPEEP設定に難渋する患者、肥満、腹腔内圧が高いことが懸念される患者など、臨床医によって経肺圧測定が必要と判断された人工呼吸管理中の患者36名を対象とした。

Ⅳ 倫理審査

本研究の対象は食道内圧バルーンの使用が臨床上適切と判断された患者であること、そして当院ではすでにCAISR法が食道内圧バルーンの空気量調整に使用されており、本研究のために日常臨床を逸脱した特別な介入がないことから、患者からの同意書は求めなかった。本研究についての情報を病院ホームページへ掲載することで、研究対象者ならびに家族が拒否できる機会（オプトアウト）を保障した。本研究は、東京ベイ・浦安市川医療センターの研究倫理委員会にて承認された（承認番号：595）。

Ⅴ 方法

1. 食道バルーンの挿入とシリンジポンプの設定

食道バルーンカテーテルを食道下部3分の1に挿入した。適切なカテーテル位置についてはPes測定波形の心臓アーチファクトの確認と胸部X線にて不透過性マーカーを確認してカテーテルの位置が適切であることの確認を行った。Pes波形を確認し、陰圧がかかるようにシリ

ンジを引いてバルーン内空気を抜き、プライミングを行い完全虚脱時のバルーン圧が $-2\sim 0\text{cmH}_2\text{O}$ となるようにセッティングした。

シリンジポンプは食道内圧バルーン接続チューブの間に三方活栓を用いて接続した。シリンジポンプの流量は1呼吸ごとに0.5mLの空気が充填されるように呼吸回数 $\times 30\text{mL/時}$ とした。これにより各患者において、食道バルーンを0 $\sim 8\text{mL}$ まで1呼吸ごとに0.5mLステップで充填できるように設定した。シリンジポンプは流量を1,200mL/時までで設定可能な、TE-312（TERUMO、日本）を使用した。

2. 人工呼吸器の設定と呼吸器系メカニクスの測定

人工呼吸器はHamilton G5またはC6（Hamilton Medical、スイス）、食道内圧バルーンはNutrivent™（Hamilton Medical、スイス）を使用した。人工呼吸器設定は、モードをAC/VC、一回換気量を4 $\sim 6\text{mL/kg}$ 、フロー波形は矩形波、吸気フローは30L/分、吸気ポーズをautoPEEPが生じない範囲で0.5 ~ 0.8 秒とした。診療で設定されていたPEEP、吸入気酸素分画（ FiO_2 ）、呼吸回数はそのまま変更しなかった。体位は仰臥位でベッドを30°頭部挙上とした。自発呼吸がある場合は測定前に数分間ほど分時換気量を増加させることで自発呼吸を消失させた。それでも自発呼吸がある場合はフェンタニルまたはプロポフォールを早送りして自発呼吸を消失させた。人工呼吸器では1画面で16呼吸を観測できるように時間スケール（60秒以上）を調整した。吸気ポーズを行って呼吸器系メカニクスの静的コンプライアンスと気道抵抗を計算した（図3）。

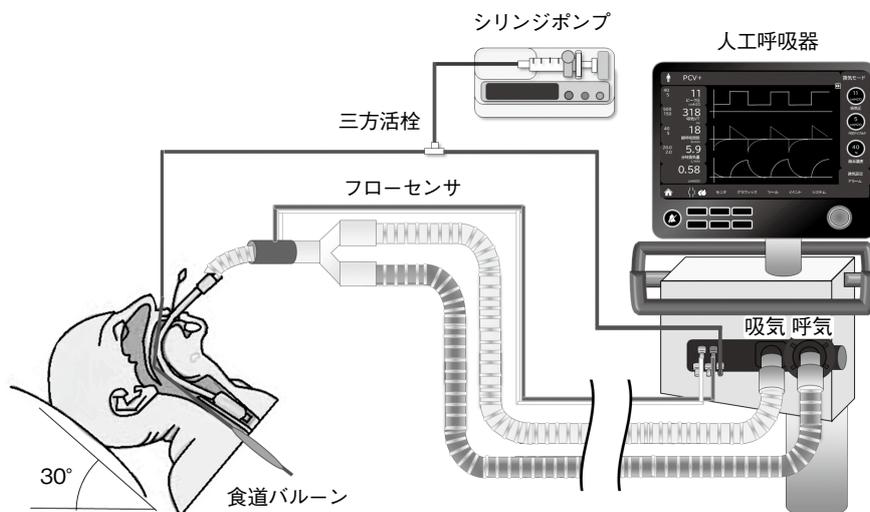


図3 接続概略図

人工呼吸器と食道バルーンを接続する際に、接続チューブの間にシリンジポンプを接続し圧力測定しながら空気を注入できるようにした。体位は仰臥位、30°頭部挙上とした。

3. 実際の測定

患者の呼気終了に合わせてシリンジポンプ充填を開始した。16呼吸カウントしたのちに食道バルーンの充填を終了し、直ちにバルーン内の空気を抜いた。人工呼吸器のグラフィックを静止させて呼吸ごとの吸気終末気道内圧（end inspiratory airway pressure：PawEI）および呼気終末気道内圧（end expiratory airway pressure：PawEE）と、PesEIおよびPesEEを記録した（図4）。各吸気終末および呼気終末はそれぞれ吸気ポーズ、呼気フローがゼロとなったタイミングとし、静的評価として用いた。吸気および呼気フローがゼロになる範囲において、Pesの心拍によるアーチファクトの影響を最小限にするため、心拍による振幅の底を測定値として選択した。同時に各呼吸におけるPesの変化（PesEI-PesEE）を記録した。この一連の測定により、RRcountとPesの関係を表す曲線が、呼気終末期とPesの変化（PesEI-PesEE）において得られた。

4. Pes-容量曲線の解析

得られたPesの曲線は、正確にはPes-時間の曲線であるが、呼吸と食道バルーン充填量を同調させているため、Pes-容量曲線とみなすことができる。このPesEE曲線上で中間の直線セクションがグラフで検出され、直線セクションの下端と上端（それぞれ V_{min} と V_{max} ）が決定された。Mojoli法と同様に、測定者が視覚的にほぼ直線であると判断した部位を直線セクションとして決定し、数値による定義は設けなかった。 V_{best} は、適切な充填範囲内で ΔPes が最大となるRRcountの最小値となり、

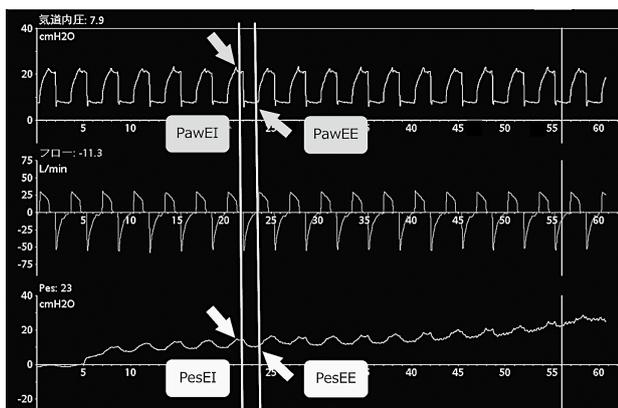


図4 気道内圧と食道内圧の測定画面

人工呼吸器のグラフィック波形で呼吸ごとのPawEIおよびPawEEをフローが0となるとところで記録した。また、同じ時相のPesEIおよびPesEEを記録した。

吸気終末気道内圧（end inspiratory airway pressure：PawEI）、呼気終末気道内圧（end expiratory airway pressure：PawEE）、吸気終末食道内圧（end inspiratory esophageal pressure：PesEI）、呼気終末食道内圧（end expiratory esophageal pressure：PesEE）

シリンジポンプの流量は1呼吸ごとに0.5mLの空気が充填されるように設定したので、RRcountの1/2が最適なバルーン充填量（mL）に対応する。

5. 気道閉塞試験と合格基準

一度すべての空気を抜き、決定した空気量をバルーンに充填し気道閉塞試験を行った。気道閉塞試験は呼気ポーズを行い、3回連続で患者の胸部を優しく圧迫しながら $\Delta Pes/\Delta Paw$ を算出し平均値を求めた。 $\Delta Pes/\Delta Paw$ が0.8~1.2であれば気道閉塞試験合格とし、臨床使用可能であると判断した。開胸手術の術後で胸部圧迫が望ましくない患者に対しては、胸部の代わりに腹部圧迫を行った。

6. 空気流量とバルーン内圧の関係の検証

CAISR法ではシリンジポンプを使用して高流量での空気充填を行うため、高流量設定によるバルーン内の圧力への影響を検証した。動的な空気の流入によって実際のPesとは無関係に測定値が上昇することが予想される。したがって、本システムにおいて患者にバルーンを挿入せずに圧力測定を行い、空気の持続的流入中の圧力測定を行った（図5）。測定は3回行い平均をとった。

7. 本法で決定した空気充填量の妥当性に影響を与える可能性のある変数の検証

呼吸器系コンプライアンス（respiratory system compliance：Crs）およびCrsに影響を与える因子であるBMI（body mass index）とPEEPと $\Delta Pes/\Delta Paw$ の関係を検証した。

8. バルーンの応力緩和の検証

食道内圧バルーンは一定の空気量まではリコイルによる力が発生するようなバルーン素材の伸張は起こらない。したがって、通常使用における空気量の範囲内ではバルーンが拡張した状態を保つために必要な圧力が時間とともに低下する応力緩和の現象は発生しないと予想した。

しかし、応力緩和が起こるとすれば、シリンジポンプで空気を連続充填しながら測定するCAISR法と、各充填量を一定の時間保つ従来の方法では応力緩和のための時間が異なり、結果に影響を与える可能性がある。したがって、通常空気量で食道バルーンの測定に影響するほどの応力緩和があるかどうかを検証するために、空気をバルーン内に0.5mLずつ手動にて充填していき、10秒間のPesの変化を測定した。また、食道バルーンを水槽に浸して水量を調節することで、さまざまなPesにおける応力緩和を再現した（図6）。

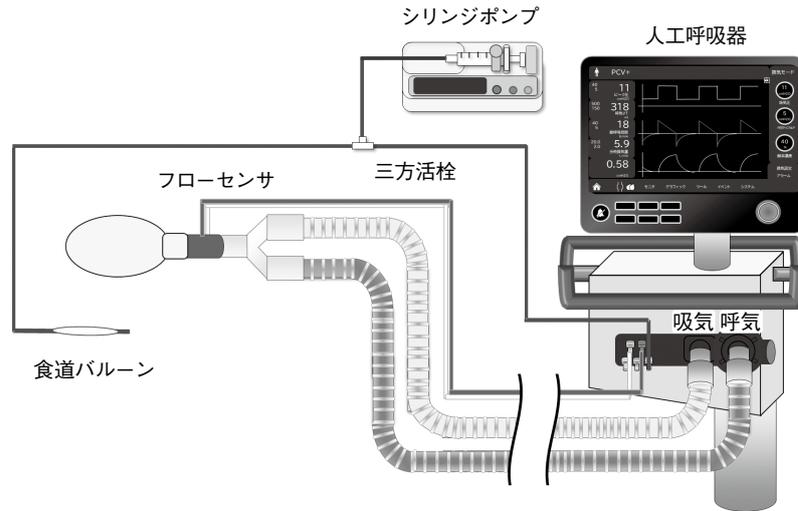


図5 バルーン空気注入流量とバルーン内圧の関係の検証における接続概略図
本システム（図1）において患者にバルーンを挿入せずに圧力測定を行った。

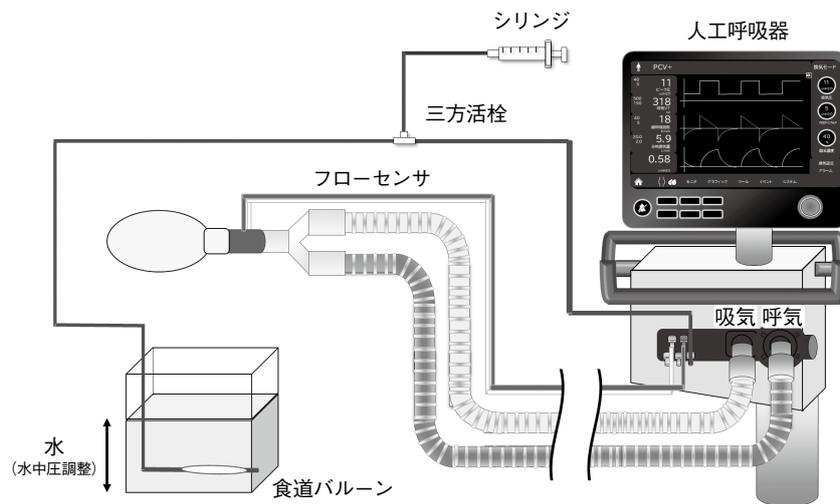


図6 バルーンの応力緩和の検証における接続概略図
本システム（図1）において患者にバルーンを挿入せず、食道バルーンを水槽に浸して水量を調節することで、さまざまな食道内圧における応力緩和を再現した。

9. 統計手法

データ解析には統計解析用ソフトウェアR（ver3.4.2）を使用し、パラメトリックデータは平均値±SDで表記し、ノンパラメトリックデータは中央値（四分位範囲）で表記し、相関はPearson積率相関で行った。統計学的有意水準は5%と設定した。

VI 結果

1. 患者特性

対象患者は男性：26人、女性：10人（72.2%、27.8%）、年齢：73.0歳（60.8～80.3歳）[中央値（四分位範囲）]、

身長：163.0cm（158.6～170.0cm）、体重：62.5kg（55.2～74.2kg）、BMI（体重[kg] / 身長[m]²）：25.3±5.9kg/m² [平均値±SD] であった。

人工呼吸器設定は、FiO₂：0.4（0.3～0.5）、PEEP：11.5±3.7cmH₂O、呼吸回数：20.0回/分（20～24回/分）、プラトー圧（plateau pressure：Pplt）：24.9cmH₂O（23.1～27.1cmH₂O）、ドライビングプレッシャー（driving pressure：Pdriv）：12.9cmH₂O（11.4～16.1cmH₂O）であった。

患者の状態および呼吸器系メカニクスは、APACHE II score：20.0（17.0～26.0）、SOFA score：8.4±3.0、Crs：

食道内圧バルーン空気量の簡便な較正法（呼吸同調持続注入法：CAISR法）の開発

表1 患者特性

特性	値
年齢 (歳)	73.0 (60.8~80.3)
男性 (人 (%))	26 [72.2]
身長 (cm)	163.0 (158.6~170.0)
体重 (kg)	62.5 (55.2~74.2)
Body mass index (kg/m ²)	25.3 ± 5.9
APACHE II score	20.0 (17.0~26.0)
SOFA score	8.4 ± 3.0
P/F 比 (mmHg)	134.5 (114.8~206.8)
V _T /PBW (mL/kg)	5.79 (5.07~6.36)
PEEP (cmH ₂ O)	11.5 ± 3.7
呼吸回数 (BPM)	20.0 (20~24)
F _I O ₂ (%)	0.4 (0.3~0.5)
P _{plat} (cmH ₂ O)	24.9 (23.1~27.1)
P _{driv} (cmH ₂ O)	12.9 (11.4~16.1)
Cr _s (mL/cmH ₂ O)	24.8 (19.7-35.9)
R _{rs} (cmH ₂ O/L/秒)	12.0 (9.0~14.3)

一回換気量 (tidal volume : V_T)、予測体重 (predicted body weight : PBW)、プラトー圧 (plateau pressure : P_{plat})、ドライビングプレッシャー (driving pressure : P_{driv})、呼吸器系コンプライアンス (respiratory system compliance : Cr_s)、呼吸器系レジスタンス (respiratory system resistance : R_{rs})
結果は数値 [群中の百分率]、中央値 (IQR) または平均値±SDで示した。

24.8mL/cmH₂O (19.7~35.9mL/cmH₂O)、R_{rs} : 12.0cmH₂O/L/秒 (9.0~14.3cmH₂O/L/秒)であった (表1)。

シリンジポンプ流量は600.0mL/時 (600.0~720.0mL/時)であった、最大流量は1,020mL/時であり最小流量は480mL/時となった。すべての患者において直線セクションが認められた (図7)。最適なバルーンの空気充填量 (V_{best}) は3.5mL (3.0~4.0mL) となった。

2. 気道閉塞試験

気道閉塞試験におけるΔP_{aw}とΔP_{es}の一致率は、胸部圧迫と腹部圧迫でそれぞれ0.87 (0.83~0.89)、0.84±0.04であり、全体としては0.86 (0.83~0.89)であった。4症例が0.8~1.2の範囲から逸脱し、不合格となった。

3. V_{best}と患者特性の関係

最適なV_{best}と患者の体型や呼吸器系メカニクスなどの各測定項目において関連はなかった (表2)。

4. V_{best}の妥当性と患者特性の関係

気道閉塞試験におけるΔP_{aw}とΔP_{es}の一致率は、

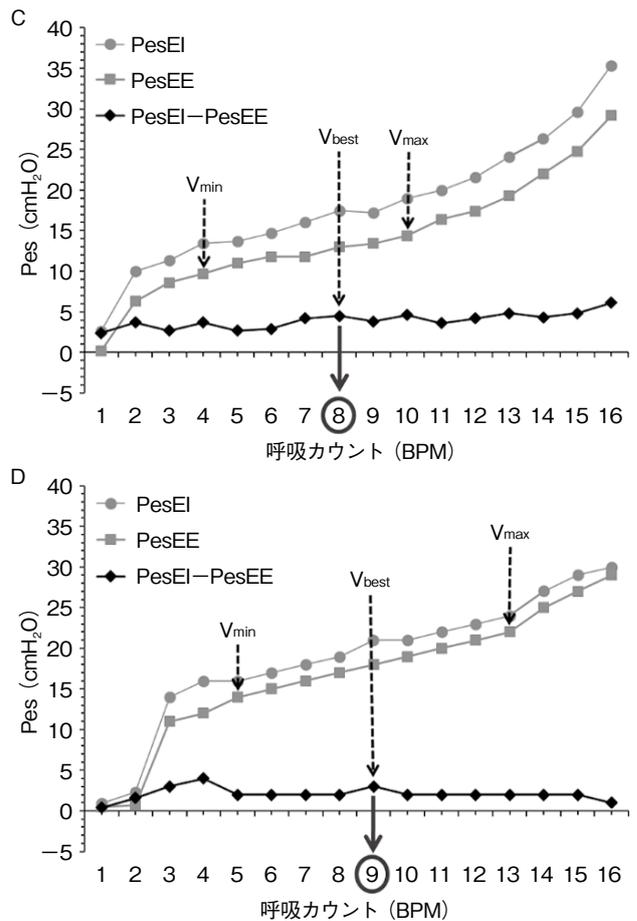
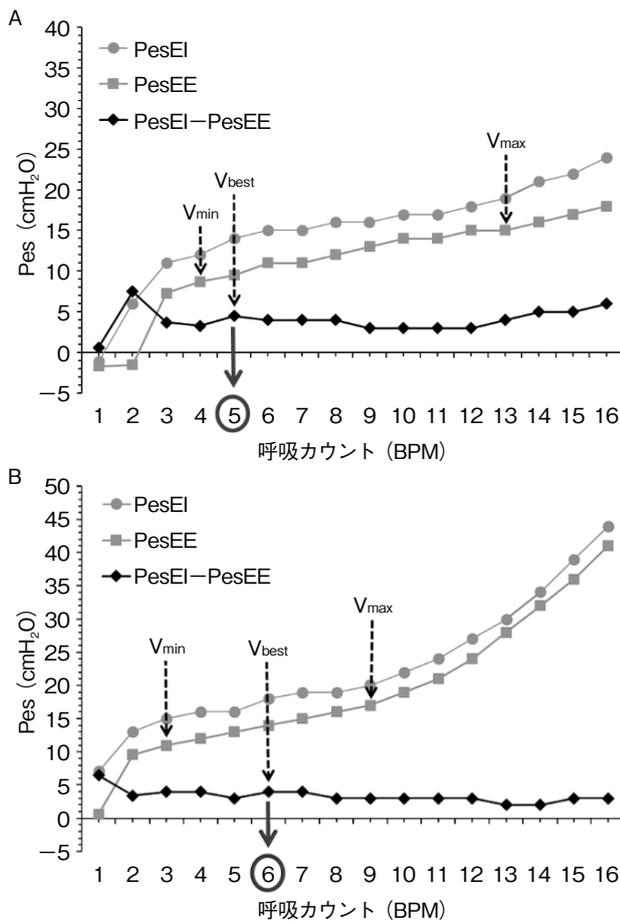


図7 測定結果 (4症例)

呼気終末のPV曲線上で、視覚的にほぼ直線であると判断した部位を直線セクションとして決定し、すべての患者において直線セクションが認められた。

吸気終末食道内圧 (end inspiratory esophageal pressure : PesEI)、呼気終末食道内圧 (end expiratory esophageal pressure : PesEE)

食道内圧バルーン空気量の簡便な較正法（呼吸同調持続注入法：CAISR法）の開発

PEEPに対して負の相関関係が見られ、PEEPが高いほど不正確になる傾向が認められた（表3）。

5. 空気の動的充填によるバルーン内圧への影響

高流量設定によるバルーン内の圧力発生については、日常臨床で想定されるバルーン充填量である2~6mLの範囲では、充填速度が大きいほど、バルーン内圧ベースラインは上昇した。バルーン充填量が2~6mLにおいて、各ポンプ流量によるバルーン内圧のベースラインの上昇

は、600mL/時で1.0cmH₂O（1.0~1.2cmH₂O）、750mL/時で1.3cmH₂O（1.2~1.4cmH₂O）、900mL/時で1.5cmH₂O（1.4~1.6cmH₂O）、1,200mL/時で2.1±0.1cmH₂Oであり、各充填量においてベースラインの上昇の度合いに流量による差は認められなかった。バルーン充填量が7.5mL以上では圧上昇の傾きが急速に大きくなり、各流量におけるバルーン内圧ベースラインの差はほぼ消失した（図8）。

表2 V_{best}と患者特性の関係

特性	相関係数	p値
バルーン空気量	-	-
Body mass index (kg/m ²)	-0.02	0.89
呼吸回数 (BPM)	0.12	0.47
V _T /PBW (mL/kg)	0.04	0.81
Crs (mL/cmH ₂ O)	-0.31	0.07
Rrs (cmH ₂ O/L/秒)	-0.03	0.84
シリンジポンプ流量 (mL/時)	0.09	0.61
気道閉塞試験	0.15	0.37

一回換気量 (tidal volume : V_T)、予測体重 (predicted body weight : PBW)、呼吸器系コンプライアンス (respiratory system compliance : Crs)、呼吸器系レジスタンス (respiratory system resistance : Rrs)

表3 V_{best}の妥当性と患者特性の関係

特性	相関係数	p値
気道閉塞試験	-	-
Body mass index (kg/m ²)	0.02	0.90
Crs (mL/cmH ₂ O)	-0.11	0.51
シリンジポンプ流量 (mL/時)	0.12	0.48
PEEP (cmH ₂ O)	-0.48	<0.01

呼吸器系コンプライアンス (respiratory system compliance : Crs)

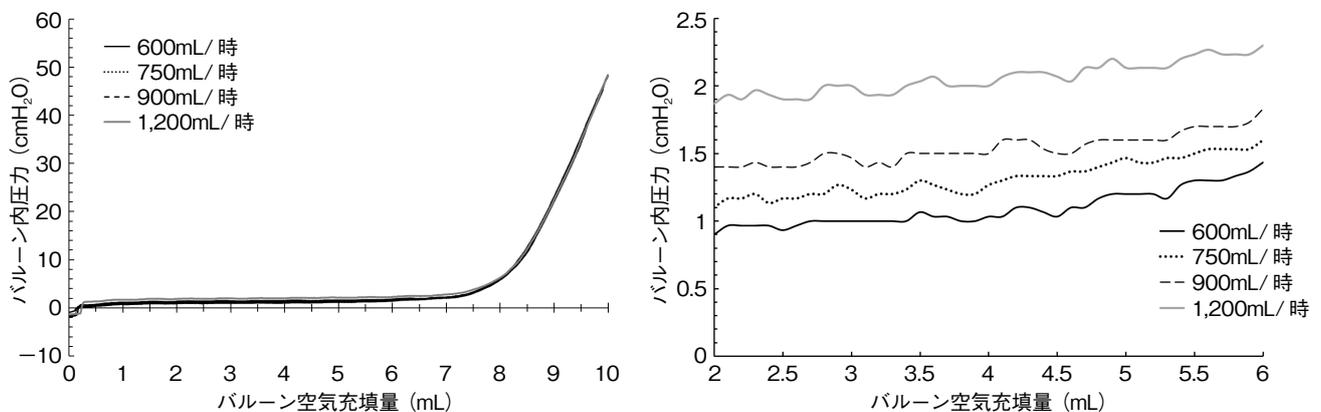
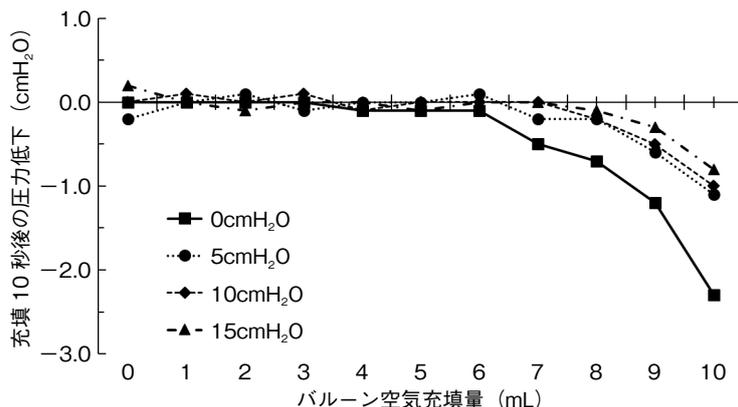


図8 各シリンジポンプ流量におけるバルーン充填量とバルーン内圧の関係

(左)：バルーン空気充填量が0~10mLの場合の全体像。バルーン充填量が7.5mL以上では各流量における差はほぼ消失した。
(右)：バルーン空気充填量が2~6mLの部分のグラフの拡大像。バルーン充填量が2~6mLの場合、流量が高いほど圧のベースラインは高くなるが、各充填量においてバルーン内圧のベースラインの上昇の度合いに流量による差は認められなかった。



【図9】 各バルーン外力におけるバルーン充填量と充填10秒後のバルーン内圧変化の関係

バルーン空気充填量が6mL以下の場合、バルーン外圧にかかわらず空気充填10秒後における圧力の低下はなかった。バルーン外力が0cmH₂Oの場合において、バルーン空気充填量が6mL以上で圧力の低下が起こった。

6. 食道内圧バルーンの応力緩和

バルーンの応力緩和については、バルーン空気充填量が6mL以下の場合、バルーン外圧にかかわらず、空気充填10秒後における圧力の低下はなかった。0.25cmH₂Oの低下を有意な低下とすると、バルーン外力が0cmH₂Oの場合において、バルーン空気充填量が6mL以上で圧力の低下が起こった。バルーン外力が高いほど応力緩和が起こる空気充填量が増加した（図9）。

Ⅶ 考察

本研究によって、CAISR法によって決定された食道バルーンの充填量は、臨床的に妥当であることが示された。気道閉塞試験は4症例が不合格となった。この4症例はすべて、チェストドレーンまたは腹腔ドレーンが留置されている症例であった。これらの患者ではPesの変化がPawの変化よりも小さくなる傾向がみられ、胸郭または腹腔が完全な閉鎖空間ではなかったことが関係していると考えられる。したがって、CAISR法にかかわらず、胸腔または腹腔ドレーンが留置されている患者においては気道閉塞試験によってV_{best}の確認はできない可能性が高い。

日常診療におけるMojoli法の問題点としては、測定を人工呼吸器本体1台で行うことが困難であり、記録を行うための別機材を用意して充填量と圧力の関係性について記録して確認する必要があること、そして各充填量においてバルーンに空気を入れ直す必要があることから、時間と手間がかかる。一方、CAISR法であれば、16回の一連の呼吸とバルーン充填量を同調させることによ

て、各充填量におけるPawとPesの呼吸性の変化を人工呼吸器の表示画面で可視化できるため、きわめて簡便である。

気道閉塞試験によるV_{best}の妥当性とPEEPの関係については負の相関関係が見られ、PEEPが高いとΔPawとΔPesの一致率が低下する傾向が認められたが、過去にこの関係性を検証した研究がないため、CAISR法に特異的な現象であるかは不明である。機序として、Pawが高いことが直接関係している可能性、またはPEEPを高くする必要がある重症患者の呼吸器系メカニクスの特性や呼气終末における含気の異質性が関係している可能性が考えられるが、今後の検証が必要である。

日常診療で使用されるバルーン充填量である2~6mLにおいては設定流量が高くなると充填時に発生する動的な圧力によってバルーン内圧のベースラインが高くなることが示されたが、ベースラインの上昇の度合いは各充填量においてほぼ不変であるため、Pesの絶対値ではなくΔPesを用いるCAISR法では圧上昇の影響は最小限であると考えられる。

本研究では、従来のMojoli法とCAISR法の結果に影響を与える可能性がある、食道内圧バルーンの特長としての応力緩和についても検証した。Pesが0cmH₂Oであれば、バルーン充填量が6mLに到達するまでは充填10秒後の圧力低下（応力緩和）は起こらず、Pesが高くなるほど応力緩和が起こるバルーンの充填量は大きくなることが示された。したがって、間欠充填、連続充填にかかわらず、日常臨床で用いられる充填量においては応力緩和の影響がない可能性が示唆された。

本研究にはいくつかのデザイン上の限界がある。第一は、本研究では同一患者においてそれぞれMojoli法とCAIRS法で求めた V_{best} の比較は行っていないため、ゴールドスタンダードであるMojoli法と比較してCAISR法がどの程度の誤差があるのかを検証できていない。第二に、本研究は食道内圧バルーンにNutrivent™のみを用いており、他社の食道内圧バルーンでは検証できていない。

VIII 結語

食道内圧バルーンへ充填する空気量を調整するうえで、患者の換気状態に影響を与えずに、簡便に施行できるCAISR法の臨床使用における妥当性が示された。

本稿のすべての著者には規定されたCOIはない。

本稿の要旨は、第45回日本呼吸療法医学会学術集会（2023年、名古屋）において発表した。

参考文献

- 1) Talmor D, Sarge T, Malhotra A, et al : Mechanical ventilation guided by esophageal pressure in acute lung injury. *N Engl J Med.* 2008 ; 359 : 2095-104.
- 2) Hedenstierna G : Esophageal pressure : benefit and limitations. *Minerva Anesthesiol.* 2012 ; 78 : 959-66.
- 3) Mojoli F, Torriglia F, Orlando A, et al : Technical aspects of bedside respiratory monitoring of transpulmonary pressure. *Ann Transl Med.* 2018 ; 6 : 377.
- 4) Mojoli F, Iotti GA, Torriglia F, et al : In vivo calibration of esophageal pressure in the mechanically ventilated patient makes measurements reliable. *Crit Care.* 2016 ; 20 : 98.