

人工呼吸療法教育システムの構築

戸梶めぐみ¹⁾・藤井裕士²⁾・塚本壮輔¹⁾・吉本寛司³⁾

KEY WORDS 呼吸療法技術, シミュレーション教育, 人工呼吸器, 仮想患者

要旨

人工呼吸療法に必要なスキルは、臨床現場で経験を積むことにより習得する方法が一般的である。本研究では、臨床前教育として時間や場所を問わず繰り返し人工呼吸療法に関する学びを深めることができる環境を実現するため、パソコン上で本療法に関する学習が可能な教育システムの構築に着手した。

グラフィカルプログラミングソフトウェアを用いて、患者呼吸動態を再現する患者シミュレーションモデル、人工呼吸器の動作を再現する人工呼吸器シミュレーションモデル、人工呼吸回路状況を再現する人工呼吸回路シミュレーションモデルから成るシステムを考案した。そして、患者呼吸動態・人工呼吸器動作・人工呼吸回路状態の基礎的なシミュレートに成功した。

今後、本システムをさらに発展させ教育ツールとして活用することで、人工呼吸器の工学的及び生理学的作用等について体感することができ、将来トラブルシューティングに必要な知識や技術習得促進の手助けになると考えた。

I はじめに

わが国における医療機器に関連する事故・アクシデント・インシデントは年間全事例の約10%を占め¹⁾、人工呼吸器に関連する事例が年間300件を上回る頻度で発生しているのが現状である²⁾。

生命維持管理装置の1つである人工呼吸器に従事するメディカルスタッフには、操作・トラブル対処さらには保守管理技術の習得およびその向上が求められている。そのため、装置の機械的知識や技術の習得のみならず、人体の生理学的知識も含めた総合的理解が必要である。これらの理解やとくに技術については、臨床現場で経験を積むことによるトレーニング (on the job training : OJT) により習得する方法が一般的である。OJTは、実務を通して業務に必要なスキルを体得することができるトレーニング方法のため、即戦力の育成に効果的である。しかし、指導者の能力によって効果に差異が生じることに加

え、とくに医療現場におけるOJTは患者に直結するリスクの観点から不用意に繰り返し実施することが難しい。

医療技術の習得がOJTに依存している現状の改善に、シミュレーションを用いた医学教育 (simulation based medical education : SBME) が有効であると報告されている³⁾。すでに我々は、体外循環分野や血液透析分野で患者状態に対応したそれぞれの技術を習得できるシステムについて開発し、臨床工学技士養成校や医療施設、医療技術トレーニング施設での教育効果の有用性について報告した^{4~14)}。

人工呼吸療法分野における技術習得のためのシミュレーション教育方法として、マネキンと人工呼吸器実機を用いたトレーニングが多く実施されている^{11,15)}。しかし、これらは換気条件設定の変更や処置などに対する生体反応の再現が乏しいうえに、インタラクティブなシミュレートもしくは教育が難しく、総合的な人工呼吸療法技術の習得には限界がある。また、トレーニングには人工呼吸器実機や医療ガス設備、マネキンやシミュレータ装置などが必要であるため、時間や場所が制限される。

そこで、著者らは人工呼吸療法に関する知識や技術を時間や場所を問わず習得できる環境の実現と、簡易的な

1) 広島工業大学生命学部 生体医工学科

2) 国立循環器病研究センター 臨床工学科

3) 立命館大学 総合科学技術研究機構

† 責任著者

[受付日：2023年3月17日 採択日：2024年12月13日]

人工呼吸療法教育システムの構築

本技術教育の普及を目標に、コンピュータ（PC）上で患者の生理学的変化や人工呼吸器動作を再現し、人工呼吸療法技術に関する学びを深めることのできるシステムの構築に着手した。

なお、本研究は第38回日本呼吸療法医学会学術集会（2016年7月開催、演題名「教育用人工呼吸技術トレーニングシステムのための仮想患者及び人工呼吸器モデルの構築」）にて報告した内容に、さらなる臨床に即した要素を追加することで充実化を図った。

II 方法

本システムは、患者呼吸動態を再現する患者シミュレーションモデル、人工呼吸器の動作を再現する人工呼吸器シミュレーションモデル、人工呼吸回路状況を再現する人工呼吸回路シミュレーションモデルから成る（図1）。これらは連動し、各モデルでの設定変更が双方向に反映する。本システムの構築には、グラフィカルプログラミングソフトウェア「LabVIEW開発システムWindows用（NATIONAL INSTRUMENTS社、米国）」を用いた。以下に、構築したシステムの各構成モデルについて説明する。

1. 患者シミュレーションモデル

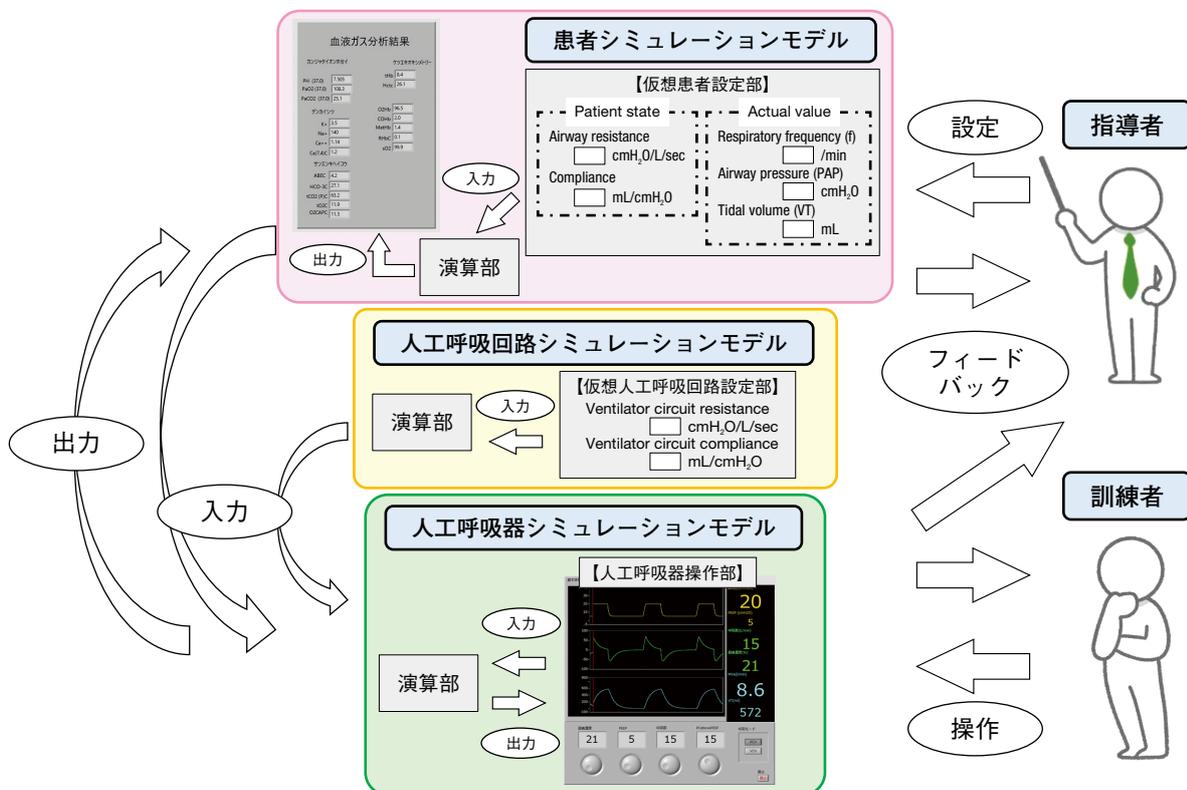
生体の呼吸器関連パラメータのうち、本システムでは患者呼吸動態変化（気道抵抗および肺胸郭コンプライアンス）を再現するために、これらを抵抗RおよびコンプライアンスCを用いて、生体の呼吸器を簡易的な電気的等価回路で表現した。

また、呼吸器関連パラメータや人工呼吸器設定の変化と血液ガスの変化を連動させ、患者呼吸動態変化をよりリアルに再現するために、吸入気酸素濃度 F_{iO_2} や肺胞換気量 V_A ・肺胞気動脈血酸素分圧較差 A_aDO_2 から PaO_2 および $PaCO_2$ を決定する関係式と、 $PaCO_2$ および HCO_3^- からpHを決定する関係式をモデルに組み込んだ。

さらに、各換気モードの呼吸器関連パラメータの変化に伴う気道内圧や一回換気量（tidal volume： V_T ）の変化を再現する関係式を立式しシステムに導入した。

2. 人工呼吸器シミュレーションモデル

呼吸器関連パラメータ変化がもたらす気道内圧もしくは V_T への影響は換気モードによって異なる。設定が一定の場合における、量規定換気（volume control ventilation：VCV）では気道内圧、圧規定換気（pressure control ventilation：PCV）では V_T が変動する現象を再現す



【図1】 考案した人工呼吸療法教育システムの構成

患者シミュレーションモデル、人工呼吸回路シミュレーションモデル、人工呼吸器シミュレーションモデルが双方向に連動し、パソコン上で人工呼吸療法教育に必要な要素を再現する。

人工呼吸療法教育システムの構築

るため、呼吸器関連パラメータから気道内圧、 V_T を決定する関係式をモデルに組み込んだ。そして、患者シミュレーションモデルにより算出された気道内圧・ガス流量・ V_T の値が表示されるとともに、各パラメータの波形がリアルタイムに表示されるよう人工呼吸器本体モニタの動作を再現した。本モニタを確認しながら訓練者が操作した換気条件（換気モード・ V_T ・吸気圧・換気回数・ $F_{I_{O_2}}$ ）の変更が再度患者シミュレーションモデルに反映され、再び人工呼吸器本体モニタの動作を変化させる仕組みとすることで、代表的な換気モード（VCV・PCV）動作を再現した。

また、ガス流量と V_T 、気道内圧と V_T との関係を示す流量-容量曲線および圧[容量]曲線を再現した。

さらに、アラーム機能（気道内圧上限下限・分時換気量上限下限）を搭載し、将来的にトラブル対処に関するトレーニングが可能な仕組みとした。

3. 人工呼吸回路シミュレーションモデル

人工呼吸回路の抵抗（ R_2 ）とコンプライアンス（ C_2 ）の要素を、生体肺を再現した電氣的等価回路に追加し、人工呼吸回路トラブルを再現する仕組みとした。 R_2 を増加させ「人工呼吸回路閉塞」、 C_2 を短絡させ「人工呼吸回路外れ」とした。また、各トラブルに対して気道内圧や換気量（ V_T ・分時換気量）、血液ガスなどを連動して変化させ、各トラブル時の人工呼吸器動作や患者呼吸動態を再現した。さらに、「人工呼吸回路閉塞」および「人工呼吸回路外れ」ボタンを作成し、ボタン操作により各

トラブルを再現する機能を搭載した。

III 結果

PC上で人工呼吸療法に関する学びを深めることができるシステムを考案し、以下の要素についてシミュレートできた。なお、各シミュレーションモデルにおけるシミュレート項目とその値の範囲を表1に示す。

1. 患者シミュレーション

呼吸器関連パラメータ（気道抵抗・肺胸郭コンプライアンス）や人工呼吸器設定およびその変化に追従した血液ガス（ Pa_{O_2} ・ Pa_{CO_2} ・pH）の変化をシミュレートできた。正常動作時の設定（表2）での1例を図2に、呼吸器関連パラメータ変化時の1例として、気道抵抗上昇時および肺胸郭コンプライアンス低下時の血液ガス分析項目シミュレート結果を図3に示す。

2. 人工呼吸器シミュレーション

代表的な換気モード（VCV・PCV）における換気条件項目設定機能およびアラーム機能（図4）、流量-容量曲線および圧[容量]曲線（図5）を再現できた。また、患者の気道抵抗や肺胸郭コンプライアンスの変化に連動した気道内圧・ガス流量・ V_T の値と波形のシミュレート結果の1例として、気道抵抗上昇時および肺胸郭コンプライアンス低下時の人工呼吸器動作（VCV設定時）を図6に示す。気道抵抗上昇時の人工呼吸器動作のシミュレート結果において、各波形の一部に鋭波が入りVCV設定時の実機に即した動作が再現できなかった。

表1 シミュレート項目とその値の範囲

各シミュレーションモデルにおいて、以下の値の範囲で各項目をシミュレートできた。

【人工呼吸器シミュレーションモデル】 シミュレート項目	シミュレート 範囲	【患者シミュレーションモデル】 シミュレート項目	シミュレート 範囲	【人工呼吸回路シミュレーションモデル】 シミュレート項目	シミュレート 範囲
一回換気量 (mL)	0~700	気道抵抗 (cmH ₂ O/L/秒)	0~50	人工呼吸回路抵抗 (cmH ₂ O/L/秒)	0~50
呼吸数 (回/分)	0~40	肺胸郭コンプライアンス (mL/cmH ₂ O)	20~100	人工呼吸回路コンプライアンス (mL/cmH ₂ O)	20~100
吸気圧 (cmH ₂ O)	0~40	pH	6.80~8.00		
吸入酸素濃度 (%)	21~100	Pa_{O_2} (mmHg)	50~150		
PEEP (cmH ₂ O)	0~20	Pa_{CO_2} (mmHg)	25~80		
気道内圧 (cmH ₂ O)	0~60	HCO_3^- (mEq/L)	24		
分時換気量 (L/分)	0.0~10.0				

表2 正常動作時の設定

各シミュレーションモデルにおいて、正常動作時の各項目を以下の値に設定した。

【人工呼吸器シミュレーションモデル】 シミュレート項目	設定値	【患者シミュレーションモデル】 シミュレート項目	設定値	【人工呼吸回路シミュレーションモデル】 シミュレート項目	設定値
一回換気量 (mL)	400	気道抵抗 (cmH ₂ O/L/秒)	5	人工呼吸回路抵抗 (cmH ₂ O/L/秒)	0~50
呼吸数 (回/分)	15	肺胸郭コンプライアンス (mL/cmH ₂ O)	40	人工呼吸回路コンプライアンス (mL/cmH ₂ O)	20~100
吸気圧 (cmH ₂ O)	15	肺胞気動脈血酸素分圧較差 (mmHg)	10		
吸入酸素濃度 (%)	40	Na ⁺	140		
PEEP (cmH ₂ O)	5	K ⁺	3.5		
		Ca ²⁺	4.3		
		HCO ₃ ⁻ (mEq/L)	24		
		Hct (%)	43.1		
		Hb (g/dL)	14.4		
		SaO ₂ (%)	99.9		



図2 血液ガス (Pao₂・Paco₂・pH) のシミュレート結果
表2に示す設定における人工呼吸器動作と血液ガスをシミュレートできた。



(a)



(b)

図3 呼吸器関連パラメータ変化時の血液ガス (PCVモード)

(a) 気道抵抗上昇時 (b) 肺胸郭コンプライアンス低下時

人工呼吸器設定は、換気モード：PCV、吸気圧：15cmH₂O、呼吸回数：15回/分、FiO₂：40%、血液ガスのPao₂・Paco₂・pH以外の項目は固定値とした。

人工呼吸療法教育システムの構築

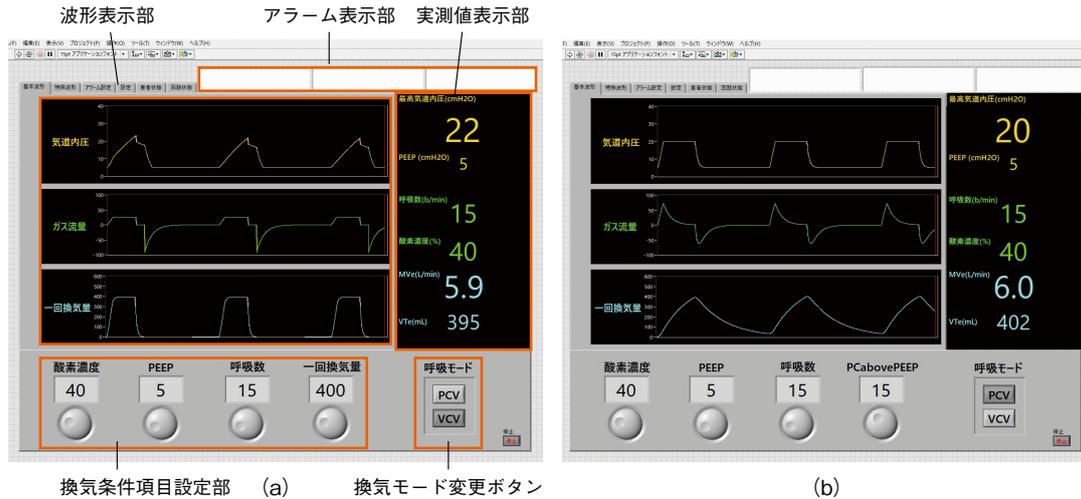


図4 人工呼吸器シミュレーションモデル

(a) VCVモード (b) PCVモード

換気条件の設定・各種波形や実測値の表示・アラーム機能など人工呼吸器動作をシミュレートできた。

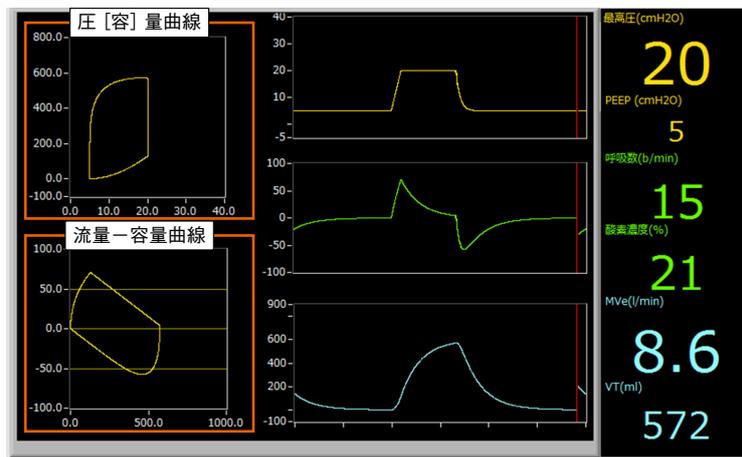


図5 圧[容]量曲線と流量-容量曲線の再現

各曲線の変化から呼吸動態変化を認知及び判断するトレーニングを可能にするために人工呼吸器のグラフィックの充実を図った。

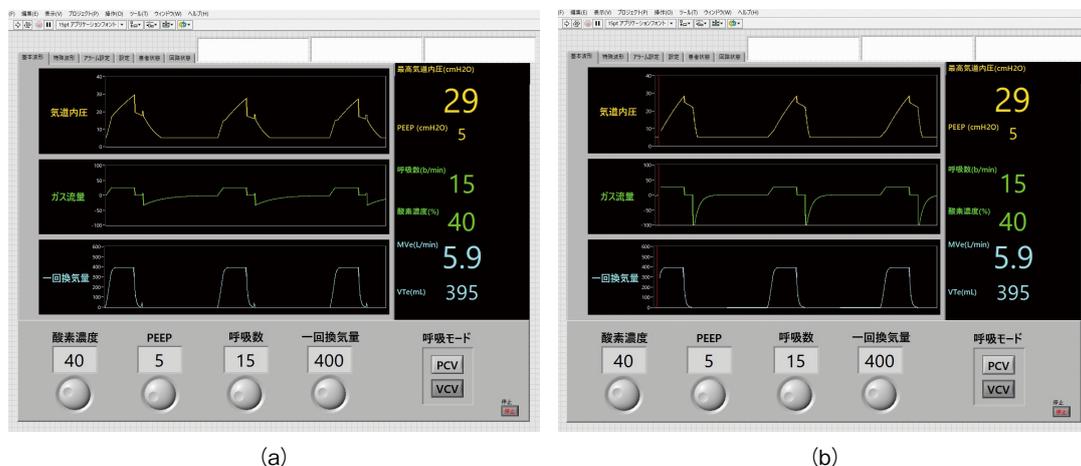


図6 呼吸器関連パラメータ変化時の人工呼吸器動作 (VCVモード)

(a) 気道抵抗上昇時 (b) 肺胸郭コンプライアンス低下時

気道抵抗上昇 (20cmH₂O/L/秒) および肺胸郭コンプライアンス低下 (20mL/cmH₂O) が生じた際の人工呼吸器動作の再現を試みた。

人工呼吸療法教育システムの構築

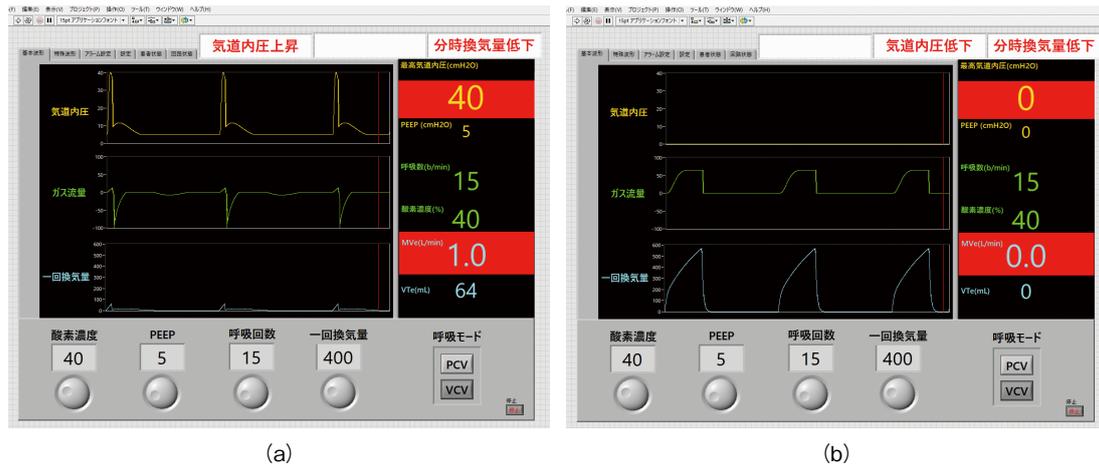


図7 人工呼吸回路トラブル発生時の人工呼吸器動作の再現

(a) 人工呼吸回路閉塞 (b) 人工呼吸回路外れ

「人工呼吸回路閉塞」や「人工呼吸回路外れ」が生じた際の人工呼吸器動作（アラームや実測値表示部など）を再現できた。

3. 人工呼吸回路シミュレーション

人工呼吸回路トラブル「人工呼吸回路閉塞」および「人工呼吸回路外れ」発生時の人工呼吸器動作や患者呼吸動態をシミュレートできた。1例として各トラブル時における人工呼吸器動作（VCV設定時）のシミュレート結果を示す（図7）。また、トラブルボタンを作成し、ワンタッチ操作により各トラブルを再現する仕組みとした。

IV 考察

今回、PC上で患者呼吸動態・人工呼吸器動作・人工呼吸回路状態をシミュレートし、各要素が連動し双方向に動作することで、人工呼吸療法技術に関する学びを深めることのできるシステムを構築した。これにより、マネキンやシミュレータ装置がない環境でもいつでも繰り返し本療法に関する学びが可能な教育ツールの実現に近づいたと考える。以下に、各モデルの意義と問題点について考察する。

1. 患者シミュレーションモデル

人工呼吸療法技術を身に付けるにあたり、人工呼吸器動作や操作、呼吸器関連パラメータ（気道抵抗・肺胸郭コンプライアンス）との関連性に関する理解のみならず、血液ガスに基づく呼吸管理に関する理解も必要である。教育ツールにおいて、患者の気道抵抗や肺胸郭コンプライアンスを再現もしくは変更可能なものは実在する。しかし、呼吸動態の評価として用いる血液ガス（ PaO_2 ・ PaCO_2 ・pH）をシミュレートする教育ツールは実在しない。本システムの患者シミュレーションモデルにおいて、人工呼

吸器設定や呼吸器関連パラメータ、人工呼吸回路状態の変化に追従した血液ガスをシミュレートできたことにより、人工呼吸療法に必要な血液ガスに関する学びが可能な教育ツールとなることが考えられる。

呼吸器関連パラメータ異常値時の血液ガスのうち、 PaCO_2 の変化に対してpHのシミュレート値にずれが生じる結果となった。現状のプログラムでは呼吸器関連パラメータ異常時におけるpHの再現に限界があり、今後システムの改良が必要であることがわかった。

また、今回シミュレートした血液ガス分析項目は PaO_2 ・ PaCO_2 ・pHであり、入力（設定）値として HCO_3^- を導入した。今後、 HCO_3^- やその他の電解質のシミュレートが可能になれば、呼吸性のみならず代謝性も含めた酸塩基平衡や電解質に関する包括的な学習の実現が期待できる。また、肺胸郭コンプライアンスの変化に伴った PaO_2 変化の再現に関して、ガス交換能（拡散能）の要素を組み込んでいないため、現状のシミュレート結果はリアルさに欠ける。ガス交換能の導入も今後の課題と考える。

2. 人工呼吸器シミュレーションモデル

換気モードの理解には、VCVおよびPCVの仕組みや患者呼吸動態との関連性に関する理解が基礎となる。今回、VCVおよびPCVの動作・流量-容量曲線・圧[容]量曲線・アラーム動作をシミュレートしたことにより、人工呼吸療法技術に必要な換気モードの基礎に関する学びが可能になると考える。

しかし、各パラメータ変更時、一部人工呼吸器動作や患者呼吸動態に不具合が生じる結果となったことから、

人工呼吸療法教育システムの構築

現状のプログラムでは人工呼吸療法の実際の再現に限界があり、今後システムの改良が必要であることがわかった。

また、既存のシミュレータには、VCV・PCVのほかに同期式間欠的強制換気 (synchronized intermittent mandatory ventilation : SIMV) や圧支持換気 (pressure support ventilation : PSV) も再現されているものが実在する。本システムでも、それらをシミュレートして、換気モード全般に関する学びを可能にする必要がある。

3. 人工呼吸回路シミュレーションモデル

人工呼吸療法技術において、人工呼吸回路の構成や原理の理解や、それらをふまえたトラブル対処技術の習得は必須である。人工呼吸器実機を用いた高価なモデル肺やマネキンタイプの高機能患者シミュレータを用いた既存の教育方法トレーニングはあるが、それらには人工呼吸回路状態をシミュレートした教育ツールは実用化されていない。本システムの人工呼吸回路シミュレーションモデルにおいて、PC上で人工呼吸回路トラブルのうち発生率の高い「人工呼吸回路閉塞」と「人工呼吸回路外れ」をシミュレートできたことにより、それらが発生した際の人工呼吸器動作や患者呼吸動態の変化について学びを深めることが可能になると考える。

今回、人工呼吸回路トラブル時の状況についてシミュレートした。現時点では、トラブル対処技術の基礎となる人工呼吸回路の構成や原理に関する理解を促す要素が組み込まれていない。人工呼吸回路構成をイラスト化し表示することに加え、人工呼吸器動作や患者呼吸動態変化と連動させることが可能になれば、より臨床に即した人工呼吸回路に関する学習の実現が期待できる。

V 結語

人工呼吸器実機や医療ガス設備、マネキンやシミュレータ装置のない環境下で人工呼吸療法のシミュレーション教育が可能なシステムを構築できた。患者呼吸動態、人工呼吸器動作、人工呼吸回路状態の3つの要素をシミュレートし、各要素を双方向に連動させたことで人工呼吸療法技術に関する学びを深めることのできるシステムであることが示唆された。

本稿のすべての著者には規定されたCOIはない。

参考文献

- 1) 日本医療機能評価機構：医療事故情報収集等事業令和2020年年報。
https://www.med-safe.jp/pdf/year_report_2020.pdf (2024年7月25日閲覧)
- 2) 日本医療機能評価機構：医療事故情報収集等事業医療事故情報/ヒヤリ・ハット事例検索。
<http://www.med-safe.jp/mpsearch/SearchReport.action> (2024年7月25日閲覧)
- 3) Nyssen AS, Larbuisson R, Janssens M, et al : A comparison of the training value of two types of anesthesia simulators : computer screen-based and mannequin-based simulators. *Anesth Analg.* 2002 ; 94 : 1560-5.
- 4) 戸梶めぐみ, 二宮伸治, 徳嶺朝子ほか : 患者基本情報に基づく体外循環シミュレータの血行動態パラメータ変更方法に検討。 *体外循環技術.* 2009 ; 36 : 24-7.
- 5) Ninomiya S, Tokaji M, Tokumine A, et al : Virtual patient simulator for the perfusion resource management drill. *J Extra Corpor Technol.* 2009 ; 41 : 206-12.
- 6) Tokumine A, Ninomiya S, Tokaji M, et al : Evaluation of basic perfusion techniques, ECCSIM-Lite simulator. *J Extra Corpor Technol.* 2010 ; 42 : 139-44.
- 7) 戸梶めぐみ, 二宮伸治, 徳嶺朝子ほか : 体外循環シミュレータ用仮想患者モデルに対する血管・心拍数制御の導入と検討。 *体外循環技術.* 2010 ; 37 : 1-4.
- 8) 戸梶めぐみ, 二宮伸治, 徳嶺朝子ほか : 体外循環教育用高再現性仮想患者シミュレータのための心機能制御モデルの検討。 *体外循環技術.* 2011 ; 38 : 59-66.
- 9) Ninomiya S, Tokaji M, Tokumine A, et al : The virtual patient simulator for the perfusion education in Japan. *Indian J Extra-Corpor Technol.* 2011 ; 21 : 12-7.
- 10) Tokaji M, Ninomiya S, Sueda S, et al : An educational training simulator for advanced perfusion techniques using a high-fidelity virtual patient model. *Artificial Organs.* 2012 ; 36 : 1026-35.
- 11) Sistino JJ, Michaud NM, Sievert AN, et al : Incorporating high fidelity simulation into perfusion education. *Perfusion.* 2011 ; 26 : 390-4.
- 12) 大森正樹, 柴田奈美, 浦野哲也ほか : 高機能患者シミュレータを用いた透析患者シミュレータの作成。 *医療機器学.* 2009 ; 79 : 27-31.
- 13) 西手芳明, 藤井俊樹, 竹澤真吾 : 血液透析シミュレータシステムの開発。 *日臨工技士会誌.* 2009 ; 17 : 283-5.
- 14) 戸梶めぐみ, 二宮伸治 : 急性期血液透析技術教育のための仮想患者シミュレーションソフトウェアシステムの開発と技能成績評価方法の検討。 *医工学治療.* 2017 ; 29 : 3-13.
- 15) Alanna H, Anita A : Simulation-based education for non-invasive ventilation. *Breathe.* 2013 ; 9 : 366-74.