

特集

人工呼吸療法—今後の展望

調節換気からウィーニングまでの自動制御

小野寺陸雄

キーワード：人工呼吸，自動制御，ウィーニング，SmartCare，INTELLiVENT[®]-ASV

I. はじめに

人工呼吸における最大の目標は患者転帰の改善である。そしてその実現のために換気モード、肺保護換気に代表される適正換気条件、ウィーニングに関する戦略、患者と人工呼吸器との同調性などさまざまな知見が積み重ねられ、人工呼吸管理は進歩を遂げてきた。しかし臨床において人工呼吸管理を行う医師のすべてがこのような知識を持っているとは限らない。専任・専従の医師が人工呼吸管理を行っているICUではそれ以外のICUと比較して死亡率が低い傾向にあるとされており¹⁾、逆に知識やマンパワーが不足している状況での人工呼吸は患者転帰の悪化に関連している可能性がある。

一方、近年の情報処理技術の進歩は従来では困難と考えられてきた分野における自動制御を可能にしつつある。人工呼吸管理も例外ではなく、高度なアルゴリズムによって調節換気からウィーニングまでの自動制御が可能になりつつある。本稿では人工呼吸器の自動制御に関するこれまでの歴史を概観し、今後の展望について考察する。

II. 人工呼吸器の自動制御システムの開発の歴史

人工呼吸器の自動制御の試みの始まりは古く、1950年代後半には呼吸終末二酸化炭素分圧（partial pres-

sure of end-tidal carbon dioxide : P_{ETCO_2} ）を指標とした換気量の自動制御^{2,3)}が発表されて以降、さまざまなシステムが考案されてきた。以下に代表的な自動制御システムを示す（表1）。

1. Mandatory minute ventilation (MMV)

MMV (mandatory minute ventilation : 強制分時換気) は1977年にHewlettらによってオリジナルが発表され⁴⁾、その後いくつかの機種に実装されて市販された。MMVの動作は機種によって細かな部分に差異があるものの、基本的には自発呼吸をベースとして目標分時換気量に満たない場合に調節換気が追加されるというモードである。目標分時換気量は臨床医が設定する。

患者の自発呼吸が不十分な場合には調節換気によって分時換気量が保証され、自発呼吸が増加するにしたがって調節換気回数が減少するため、ウィーニングの促進が期待された。一方で分時換気量のみを目標としており、呼吸回数や呼吸様式、呼吸仕事量は考慮されないため、浅い頻呼吸や過大な吸気努力の場合に適切な換気補助が行われない可能性がある。

2. SmartCare[®]/PS

1980年代後半から90年代初頭にかけて、プロトコルに基づいて自動的にウィーニングを行うシステムがいくつか考案された。Dräger社のSmartCare[®]/PSはそのうちのDojatらによるPS圧の自動制御システム⁵⁾をもとにしている。SmartCare[®]/PSでは呼吸回数、一回換気量、 P_{ETCO_2} が目標範囲内に入るようにプロトコ

表 1 代表的な人工呼吸器の自動制御システムの特徴

	自動制御の 目標	出力方法	対応する 換気様式	自動 ウィーニング	手動入力が必要な情報
MMV	分時換気量	調節換気回数	自発 + 調節	—	目標分時換気量
SmartCare®/ PS	呼吸回数 一回換気量 P _{ET} CO ₂	PS 圧	自発	○	PS 圧の初期設定 病態 (COPD、中枢神経障害) 気管挿管 or 気管切開 加温加湿器 or 人工鼻
INTELLiVENT®-ASV	分時換気量 P _{ET} CO ₂ SpO ₂	調節換気回数 PC/PS 圧 PEEP FiO ₂	自発 + 調節	○	身長 病態 (ARDS、脳損傷、慢性高 炭酸ガス血症)

ルに従って PS 圧が自動的に増減される。一定時間呼吸状態が安定している場合には PS 圧は漸減され自動的にウィーニングが行われる。臨床医が設定するのは最初の PS 圧のほか、体重、病態 (COPD 〈chronic obstructive pulmonary disease: 慢性閉塞性肺疾患〉・中枢神経障害の有無)、挿管および加温の方法である。

SmartCare®/ PS は手動のウィーニングよりもウィーニングの期間を短縮するとされている⁶⁾。ただしウィーニングの自動化を目的としたシステムのため、調節換気まで含めた自動制御を行うことはできない。また目標とする呼吸回数や一回換気量、P_{ET}CO₂の範囲は病態ごとに固定であり、患者の肺メカニクスが変化した場合に追従できないといった限界がある。

3. INTELLiVENT®-ASV

INTELLiVENT®-ASV は 1991 年に Tehrani によって発表されたシステム⁷⁾まで遡ることができる。このシステムはその後 Hamilton Medical 社によって adaptive lung ventilation として発表され⁸⁾、adaptive-support ventilation (ASV) という名称で実用化された。ASV は従圧式 SIMV (synchronized intermittent mandatory ventilation: 同期式間欠的強制換気) + PS をベースとしており、目標分時換気量を維持するという点では MMV に類似しているが、Otis らによる理論⁹⁾を用いて呼吸仕事量が最小となるような呼吸回数と一回換気量を設定するのが特徴である。患者の自発呼吸回数が少ない場合には調節換気が行われ、一回換気量は PC 圧または PS 圧によって自動制御される。目標分時換気量は理想体重から算出される分時換気量に対する割合 (%MinVol) として臨床医が設定する。%MinVol は手動調節が必要である。ASV は従来のウィーニング

よりもウィーニングに要する時間を短縮するとされている^{10~12)}。

INTELLiVENT®-ASV は P_{ET}CO₂ と SpO₂ センサーを加えることで ASV をさらに進化させたシステムとなっている。臨床医が設定するのは身長 (理想体重の算出に使用) と病態 (ARDS 〈acute respiratory distress syndrome: 急性呼吸促迫症候群〉、脳損傷、慢性高炭酸ガス血症) であり、設定した病態と P_{ET}CO₂ によって %MinVol も自動的に調節される。一定時間呼吸状態が安定している場合に %MinVol を漸減してウィーニングを行う機能 (Quick Wean 機能) や、自発呼吸トライアルを行う機能も備えている。酸素化は SpO₂ の情報をもとに ARDS Network のテーブル¹³⁾に基づいて PEEP (positive end-expiratory pressure: 呼気終末陽圧)、FiO₂ を自動調節する。これらの自動制御によって手動調節の回数が大きく減少し、良好な呼吸状態にある時間の割合が増加するとされている¹⁴⁾。

Ⅲ. 今後の展望

自動制御システムは入力される情報に基づいて、目標とする結果が得られるように一定のルールに従って出力を制御するシステムである。出力によって得られる結果はフィードバックされ、次の出力のための情報として使用されて繰り返し制御が行われる。従ってどのような情報を入力するか、それをどのようなアルゴリズムで処理し、どのような方法で出力するかが問題となる。

1. 入力情報

1) 病態をより適切に反映する情報の必要性

Dojat らは自動制御を 3 つのレベルに分類している¹⁵⁾。

第1レベルは1つの変数に基づいてミリ秒単位でフローや圧を制御するものである。第2レベルはいくつかの生理学的な変数を用い、固定された生理学的モデルに基づいて1～2呼吸単位で制御するものであり、分時換気量や一回換気量、呼吸回数、 $P_{ET}CO_2$ などを入力情報とする現在の自動制御システムはこれに該当する。

第3レベルは情報を統合して病態とその変化を解釈して制御するレベルであり、現在は臨床医によって行われている。このレベルの自動制御を実現するには、病態をより適切に反映する入力情報を見出すことが必要である。EIT (electrical impedance tomography) や食道内圧、Edi (electrical activity of diaphragm: 横隔膜電気活動)、あるいは循環に関連した情報などが候補となるかもしれない。

2) 精度と安定性

入力情報に関するもう1つの問題はその精度と安定性である。 $P_{ET}CO_2$ と $PaCO_2$ との乖離や末梢循環不全での SpO_2 の測定エラーのような精度の低い情報・情報の欠落は、不適切な換気の原因となる。一回換気量は比較的精度の高い情報と考えられるが、気胸によるエアリークなどが生じる可能性もある。信頼性の高い技術の採用やノイズ除去技術などの向上、相補的な複数の情報の使用による冗長性の確保など、さまざまな方法により情報の精度と安定性を向上させる必要があると考えられる。

2. アルゴリズム

自動制御のアルゴリズムはあくまでも開発時点における知見に基づいたものである。例えばINTELLiVENT®-ASVにおける酸素化の調節はARDS networkのテーブルに従っているが、個別の患者における最適なPEEPに関しては議論の余地がある。またSmartCare®/PSやASVはウィーニングに要する時間を短縮するが、それらのウィーニングのアルゴリズムが最適化されているかどうかは不明である。新しい知見が得られればそれに応じてアルゴリズムを見直す必要がある。

3. 出力方法

現在の自動制御システムの多くはPC圧やPS圧という形で出力を行っている。これは開発時の歴史的背景や、PCV (pressure control ventilation: プレッシャーコントロール換気) やPSV (pressure support venti-

lation: プレッシャーサポート換気) が多くの臨床において使用されてきた実績によるところが大きいと考えられるが、これらが最良であるかどうかは不明である。患者と人工呼吸器との同調性は人工呼吸管理における重要な問題の1つであるが、この点に関してPAV (proportional assisted ventilation: 比例補助換気) やNAVA (neurally adjusted ventilatory assist: 神経調整換気) はPSVよりも優れているとされている^{16, 17)}。今後これらによる自動制御システムが登場する可能性もあるかもしれない。

IV. おわりに

人工呼吸管理に関する知見を反映させた自動制御システムはすでに実用域に入っており、特に人工呼吸管理の専門家がいらない施設やマンパワーが不足している施設においては有用と考えられる。自動制御システムがさらに進歩すれば、多くの患者に対して適切な人工呼吸を提供できるようになり、患者転帰の改善に繋がることが期待される。

本稿の著者には規定されたCOIはない。

参考文献

- 1) 日本集中治療医学会 ICU 機能評価委員会, 平成 20 年度厚生労働科学研究班: ICU の人員配置と運営方針が予後に与える影響について. 日本集中治療医学会雑誌. 2011; 18: 283-94.
- 2) Saxton GA Jr, Myers G: A servomechanism for automatic regulation of pulmonary ventilation. J Appl Physiol. 1957; 11: 326-8.
- 3) Frumin MJ, Bergman NA, Holaday DA: Carbon dioxide and oxygen blood levels with a carbon dioxide controlled artificial respirator. Anesthesiology. 1959; 20: 313-20.
- 4) Hewlett AM, Platt AS, Terry VG: Mandatory minute volume. A new concept in weaning from mechanical ventilation. Anaesthesia. 1977; 32: 163-9.
- 5) Dojat M, Brochard L, Lemaire F, et al: A knowledge-based system for assisted ventilation of patients in intensive care units. Int J Clin Monit Comput. 1992; 9: 239-50.
- 6) Burns KE, Meade MO, Lessard MR, et al: Wean earlier and automatically with new technology (the WEAN study). A multicenter, pilot randomized controlled trial. Am J Respir Crit Care Med. 2013; 187: 1203-11.
- 7) Tehrani FT: Automatic control of an artificial respirator. Engineering in Medicine and Biology Society: Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE. Washington, 1991, pp1738-9.
- 8) Laubscher TP, Heinrichs W, Weiler N, et al: An adaptive

- lung ventilation controller. *IEEE Trans Biomed Eng.* 1994 ; 41 : 51-9.
- 9) Otis AB, Fenn WO, Rahn H : Mechanics of breathing in man. *J Appl Physiol.* 1950 ; 2 : 592-607.
- 10) Sulzer CF, Chiolerio R, Chassot PG, et al : Adaptive support ventilation for fast tracheal extubation after cardiac surgery : a randomized controlled study. *Anesthesiology.* 2001 ; 95 : 1339-45.
- 11) Gruber PC, Gomersall CD, Leung P, et al : Randomized controlled trial comparing adaptive-support ventilation with pressure-regulated volume-controlled ventilation with automode in weaning patients after cardiac surgery. *Anesthesiology.* 2008 ; 109 : 81-7.
- 12) Kirakli C, Ozdemir I, Ucar ZZ, et al : Adaptive support ventilation for faster weaning in COPD : a randomised controlled trial. *Eur Respir J.* 2011 ; 38 : 774-80.
- 13) Ventilation with lower tidal volumes as compared with traditional tidal volumes for acute lung injury and the acute respiratory distress syndrome. The Acute Respiratory Distress Syndrome Network. *N Engl J Med.* 2000 ; 342 : 1301-8.
- 14) Lellouche F, Bouchard PA, Simard S, et al : Evaluation of fully automated ventilation : a randomized controlled study in post-cardiac surgery patients. *Intensive Care Med.* 2013 ; 39 : 463-71.
- 15) Dojat M, Pachet F, Guessoum Z, et al : NeoGanesh : a working system for the automated control of assisted ventilation in ICUs. *Artif Intell Med.* 1997 ; 11 : 97-117.
- 16) Xirouchaki N, Kondili E, Vaporidi K, et al : Proportional assist ventilation with load-adjustable gain factors in critically ill patients : comparison with pressure support. *Intensive Care Med.* 2008 ; 34 : 2026-34.
- 17) Schmidt M, Kindler F, Cecchini J, et al : Neurally adjusted ventilatory assist and proportional assist ventilation both improve patient-ventilator interaction. *Crit Care.* 2015 ; 19 : 56.