

●短 報●

慢性期用タービン型人工呼吸器の酸素使用量についての考察
—ピストン型人工呼吸器との比較から—山本 真¹⁾・道越淳一²⁾

キーワード：人工呼吸器，タービン型人工呼吸器，酸素使用量

I. 緒 言

人工呼吸管理は、ICU や呼吸器専門病棟で行われてきた急性期管理だけでなく、現在では一般病棟や、在宅での慢性期管理にまで広がっている^{1,2)}。急性期呼吸管理で用いられる人工呼吸器は、全て FiO_2 を 0.21 ~ 1.0 まで正確に調整する機能を有する。しかし、慢性期用人工呼吸器では、 FiO_2 を調整する機能は稀で、同一換気条件下では人工呼吸器の酸素接続口から添加される酸素流量で決定される。

神経・筋疾患などの慢性期人工呼吸患者は、高濃度の酸素添加を必要としない。しかし、経過中に呼吸器感染症を合併するなどの理由で、酸素化が悪化する事態は少なからず発生する。また、間質性肺炎患者の慢性期呼吸管理では多量の酸素を必要とすることも多い³⁾。

我々は、慢性期領域で用いられる人工呼吸器の主たる駆動方式が、ピストン型からタービン型に変化して、酸素使用量が以前より増大したと感じてきた。そこで、現在の慢性期医療（在宅医療を含む）に多く使われているタービン型人工呼吸器での酸素使用量を測定し、ピストン型人工呼吸器と比較して検討したので報告する。

II. 対 象

タービン型人工呼吸器として、レジェンドエア(AIROX、

フランス;以下,LA)、クリーンエア VS ULTRA (ResMed、フランス;以下,ULTRA)、トリロジー 100 (Respironics、アメリカ;以下,TL)、Puritan Bennett 560 (COVIDIEN、アイルランド;以下,560)、Monnal T50 (Air Liquide Medical Systems、フランス;以下,T50) それに VIVO50 (Breas、スウェーデン) を検討対象とした。これらは、現在わが国で使用されている主要な慢性期用タービン型人工呼吸器である。これらの機種は、いずれも FiO_2 の設定ができない。

なお、比較対照用のピストン型人工呼吸器には、LP6 plus (Aequitron Medical、アメリカ;以下,LP6) を用いた。

III. 方 法

1. 酸素使用量の測定

一回換気量（以下、 V_T ）が 300mL、400mL および 600mL において、 FiO_2 値が 0.5 および 0.8 を維持するために必要な酸素使用量を、各機種で測定した。コンプライアンス値を 50mL/cmH₂O、気道抵抗値を 5cmH₂O/L/秒とした SMS モデル肺（SMS、イギリス）を用いて模擬回路 A を作成した（Fig.1）。

V_T の設定は、従圧式換気モードで、フローアナライザ PF-300TM (imtmedical、スイス;以下,PF300) で測定した V_T が、目標値の ±10mL 以内になるように人工呼吸器の吸気圧を設定した。ただし、対照用の LP6 は従圧式換気モードがないため従量式換気とし、同様の方法で V_T の設定を行った。換気設定は、全て IE 比 1 : 3、吸気時間 1秒/回とした。

1) 大分協和病院 内科

2) 小倉記念病院 検査技師部 工学課

[受付日：2015年2月24日 採択日：2015年11月2日]

酸素使用量の測定は、酸素接続口から酸素を供給した人工呼吸器を模擬回路で動作させ、PF300で FiO_2 の目標値の $\pm 1\%$ 以内となるように酸素流量計を調整し、数分待ってPF300での測定値が安定したところで酸素チューブを人工呼吸器の酸素接続口から外し、PF300で酸素流量を測定した。一方、対照用のLP6は酸素接続口がないため、メーカー製の酸素添加用リザーバチューブを吸気孔に接続した。測定は、各機種で各設定ごとに3回行い、平均値を求めた。平均値の比較は、t検定を用いて $P < 0.05$ を有意とした。有意差検定は、SPSS12.0を用いた。

なお、VIVO50は、PF300での酸素濃度測定が5分以上たっても安定せず、測定値が上がり続けるという現象が見られた。VIVO50は、PF300による流量測定より、呼気弁から人工呼吸器側への呼気流の噴き出し（以下、バックフロー）が生じていることが判明し、VIVO50は呼気終末陽圧（positive end-expiratory pressure: PEEP）ゼロでは定常流が流れていなかったため、この酸素濃度の持続的上昇は、再呼吸現象に原因があると考えられた。そのため、VIVO50は今回の評

価から除外した。

今回測定した他のタービン型全機種も同様にバックフローの有無を観察したが、バックフローが測定された他のタービン型機種はなかった。なお、呼吸回路は、それぞれの人工呼吸器メーカーが推奨する呼気弁回路を用いた。

2. 酸素 10L 添加での定常流および吸気フローの酸素濃度測定

タービン型人工呼吸器の特性を把握するため、定常流（bias flow）の流量および酸素濃度と、吸気フローの酸素濃度をPF300で測定した。互いのフローの影響を除外するため、人工呼吸器とPF300を直結させた模擬回路Bを作成した（Fig.2）。定常流の酸素濃度の測定は、安定した測定値を得るために、各機種で可能な換気回数最低値で測定した。定常流および吸気フローの酸素濃度の測定は、互いの影響を排除するため、それぞれのフローが入ったところでPF300と人工呼吸器を遮断し、回路を閉じて測定した。

IV. 結 果

各機種ごと、 V_T 別の $FiO_2 = 0.5$ の酸素使用量の測定結果をTable 1に、 $FiO_2 = 0.8$ のそれをTable 2に示した。タービン型では、 $FiO_2 = 0.5$ において、 $V_T = 300\text{mL}$ と 400mL では全機種が有意に酸素使用量が大きかった。 $V_T = 600\text{mL}$ ではULTRAのみ有意に酸素使用量が少なかったが、それ以外の機種は酸素使用量が有意に大きかった。 $FiO_2 = 0.8$ では、測定可能とした $15\text{L}/\text{分}$ 以下で、全てのタービン型の酸素使用量が有意に大きかった。ピストン型のLP6では、等しい FiO_2 を達成するための酸素使用量が、 V_T と用量依存関係があるのに対し、タービン型ではそのような関係を認めなかった。タービン型機種の中で、ULTRA、T50は、

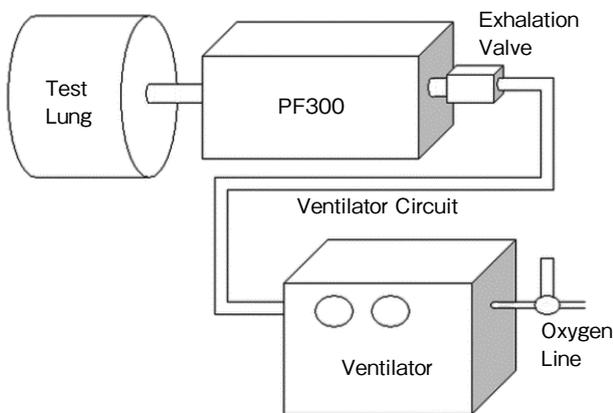


Fig. 1 The model circuit "A" for measurement of oxygen consumption by the ventilator

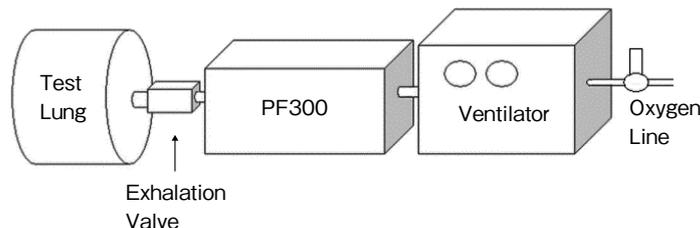


Fig. 2 The model circuit "B" for measurement of bias flow and inspiration flow by the ventilator

Table 1 Oxygen consumption (L/min) for ventilators according to tidal volumes (F_IO₂=0.5)

	LP6	ULT	T50	LA	560	TL
V _T		***	***	***	***	***
300mL	1.86±0.04	3.37±0.01	4.19±0.72	5.98±0.22	9.54±0.15	9.67±0.13
400mL	2.59±0.14	3.27±0.15	4.46±0.47	8.55±0.26	9.28±0.46	10.58±0.05
600mL	4.04±0.29	3.58±0.01	4.37±0.02	6.41±0.12	6.60±0.17	6.43±0.09

Abbreviations : ULT : ULTRA ; T50 : Monnal T50 ; LA : Legendair ; 560 : PB560 ; TL : Trilogy100

V_T : tidal volume

Significance level : *** : P<0.001 ; ** : P<0.01 ; * : P<0.05

Table 2 Oxygen consumption (L/min) for ventilators according to tidal volumes (F_IO₂=0.8)

	LP6	ULT	T50	LA	560	TL
V _T		***	***	***		
300mL	3.79±0.04	7.83±0.03	7.87±0.08	10.03±0.05	>15.0	>15.0
400mL	5.25±0.03	7.54±0.02	9.86±0.06	14.48±0.10	>15.0	>15.0
600mL	8.30±0.09	9.01±0.02	11.80±0.05	>15.0	>15.0	>15.0

Abbreviations : ULT : ULTRA ; T50 : Monnal T50 ; LA : Legendair ; 560 : PB560 ; TL : Trilogy100

V_T : tidal volume

Significance level : *** : P<0.001 ; ** : P<0.01 ; * : P<0.05 data>15.0 can not calculate p value.

Table 3 O₂ concentration and flow rate of inspiration flow and bias flow at 10L/min O₂ added

	ULT	T50	LA	560	TL
V _T =300					
Ins flow O ₂ (%)	89.7±0.40	90.6±2.89	98.2±0.12	84.3±1.33	81.3±2.18
Bias flow O ₂ (%)	98.5±0.65	99.3±0.58	99.6±0.06	96.2±2.93	87.2±0.20
Bias flow (L/min)	9.0	5.0	2.4	9.4	8.1
V _T =400					
Ins flow O ₂ (%)	69.0±2.36	84.8±1.20	89.9±1.02	76.2±1.15	78.9±1.05
Bias flow O ₂ (%)	97.1±0.85	97.5±0.72	97.5±1.86	97.3±0.21	88.1±0.06
Bias flow (L/min)	8.9	5.3	2.6	3.4	8.3
V _T =600					
Ins flow O ₂ (%)	53.7±1.96	68.5±1.22	65.8±2.06	55.6±1.58	62.3±1.94
Bias flow O ₂ (%)	96.2±0.50	95.9±0.72	94.4±0.30	93.4±0.87	87.7±0.06
Bias flow (L/min)	9.3	5.4	3.1	3.9	8.3

Abbreviations : ULT : ULTRA ; T50 : Monnal T50 ; LA : Legendair ; 560 : PB560 ; TL : Trilogy100

V_T : tidal volume ; Ins flow : inspiration flow

同一 F_IO₂ を得るための酸素使用量が比較的少なかった。しかし、この2機種は、流入酸素量を上げると酸素回路圧が上昇する現象が見られた。

酸素 10L 添加時でのタービン型人工呼吸器の定常流と吸気フローの測定結果を Table 3 に示す。全機種とも吸気フローより定常流の方が酸素濃度が高いことが分かった。吸気フローの酸素濃度は、全機種ともピストン型のような用量依存関係が見られたが、定常流で

はそのような関係は見られなかった。定常流の流量は、IE 比 1 : 3、15 回/分での値を示すが、ULTRA がもっとも大きく、次いで TL、Monnal、560 の順で、LA の定常流が最も小さかった。なお、LA は換気回数を減じて呼吸相を延長させると、定常流が漸減し停止に至った。

V. 考 察

可搬型人工呼吸器の研究として、Blakeman らは、ポータブルベンチレータ 4 機種 (LTV1200、HT70、HAMILTON-T1、EMV) の酸素使用量について、 $FiO_2 = 1.0$ で比較検討⁴⁾している。この 4 機種では、HT70 のみがピストン型であり、他はタービン型である。4 機種の間では、LTV1200 が最も酸素使用量が大きく、酸素使用量が大きくなる要因として定常流を挙げている。タービン型人工呼吸器の酸素使用量が大きいという問題を考察するにあたり、タービン型に特有の定常流について検討する必要がある。

今回の、酸素 10L/分添加による測定では、定常流の酸素濃度は常に吸気フローの酸素濃度より高濃度であることが分かった。ピストン型人工呼吸器である LP6 では、定常流は構造上存在せず、換気は全てピストンからの吸気フローに依存する。吸気フローが呼吸回路内を後ろから押し出す形で吸気が患者に送られる。したがってピストン型での酸素使用量は、吸気フローの酸素濃度のみが要因となるため、 V_T と単純な用量依存関係となる。

しかし、タービン型では吸気フローの他に定常流が影響する。呼吸回路は、通常の呼吸回路 (標準内径 22mm) 1.6m の長さでは、計算上約 600mL の容量がある。したがって、 V_T が 600mL 以内であれば、吸気開始直前の呼吸回路内の酸素濃度が次回吸気に反映され、吸気フローの酸素濃度は影響しないことになる。定常流がもし 12L/分であれば、それは 200mL/秒であるため、今回の設定である呼気 3 秒では、定常流の酸素濃度のみが次回吸気での酸素濃度となる。

定常流は、いずれの機種も 12L 以下であったため、回路内に残存した前回の吸気フローと定常流の混合気が次回吸気として構成される。そのため、吸気酸素濃度は、定常流の酸素濃度と流量、吸気フローの酸素濃度の 3 要因が関係することになる。今回の我々の測定では、吸気フローの酸素濃度は V_T と用量依存関係にあるが、定常流の酸素濃度は、 V_T に関わらずほぼ一定であり、吸気フローの酸素濃度より高かった。そのため、定常流が大きいほど FiO_2 は高くなることになる。これは呼吸回路が酸素リザーバーの役割を果たすことになるからである。そして、これがタービン型人工呼吸器が、ピストン型のように酸素使用量が V_T と用量依存

関係にならない理由である。今回 $FiO_2 = 0.5$ で、560 と TL で観察された、 $V_T = 600\text{mL}$ の酸素使用量が、 $V_T = 300\text{mL}$ や 400mL より少ない現象も、酸素濃度が異なる 2 つのフローによる回路内での混合気の構成の差に起因している。

今回の測定では、ULTRA の酸素使用量が最も少なかったが、それは本機種の定常流の酸素濃度が高いことと、定常流の流量が最大であることに起因していると考えられる。ただし、ULTRA と T50 では、高流量酸素を添加すると、酸素供給ラインの圧が上昇するという問題があった。ULTRA は、8L/分以上の酸素供給をしないようディーラーから注意喚起がなされている⁵⁾。他方、慢性呼吸管理の現場で現在数多く使われている TL、560 は、比較的大きな酸素使用量を必要とすることが判明した。

医療保険における酸素費用は、以下の式で求められる⁶⁾。

$$\text{酸素償還価格} = (R \times Q \times 1,440 \times 1.3) \times \text{日数}$$

R : 酸素購入価格 (通常 0.18 ~ 0.19 円 (設置式液酸化素貯槽の場合))

Q : 1 分あたりの酸素流量 (L)

係数 1,440 : 24 時間を分で換算したもの

1.3 : 補正率

すなわち、酸素購入価格 0.19 円/L であった場合は、1 ヶ月 30 日として、酸素使用量 1L/分あたり 10,670 円が 1 ヶ月あたりの償還価格となる。

わが国では、木村ら⁷⁾は、急性期人工呼吸器における酸素使用量と経済性を検討し、100%酸素で最大 1 日 2,600 円の赤字となる機種があると報告している。急性期医療での酸素費用の扱いは、出来高払いであれば、酸素使用量の多寡が経営に与える影響は少ない。しかし、現在での慢性期医療の取り扱い、特殊疾患療養病床のみ酸素は出来高払いであるが、その他の療養型や 90 日以上長期入院では、酸素費用の補填は保険医療上存在せず、全て医療機関側の負担となる⁶⁾。したがって、高用量の酸素が必要な場合は、無視しえないコストが発生することになる。

もとより原資が限られている慢性期医療において、同じ FiO_2 を維持するために多量の酸素を必要とする機種の使用は、対象患者が多いと病院の経営リスクとなりうる。よって高い FiO_2 を必要とする患者には、酸素使用量の少ない機種を選択することが現実的といえよ

う。人工呼吸器メーカーに対しても、より酸素使用量の少ないシステムへの改良を求めたい。それは、定常流の流量を大きくすることで、呼吸回路自体をより積極的に酸素リザーバーとして使うことにより可能と思われる。

VI. 結 論

タービン型人工呼吸器の酸素使用量は、機種による差はあるが、ピストン型人工呼吸器より大きく、かつピストン型で見られた V_T と酸素使用量での用量依存関係は見られなかった。定常流の酸素濃度は、吸気フローの酸素濃度より高く、上記の現象は、呼気相で呼吸回路に流される定常流が原因と考えられた。

本論文の要旨は第36回日本呼吸療法医学会学術総会（2014年、秋田）にて発表した。

本稿の全ての著者には規定されたCOIはない。

参考文献

- 1) 木村謙太郎：在宅人工呼吸療法. 人工呼吸療法：最近の進歩. 西野 卓編. 東京, 克誠堂出版, 2000, pp195-207.
- 2) 山本 真：在院人工呼吸から在宅人工呼吸へ、医療機関の取り組み. 人工呼吸. 2007; 24: 105-11.
- 3) 栗原正人, 川前金幸：肺線維症. 呼吸管理の最新戦略. 安本和正編. 東京, 克誠堂出版, 2005, pp98-105.
- 4) Blakeman TC, Branson RD: Evaluation of 4 new generation portable ventilators. Respir Care. 2013; 58: 264-72.
- 5) 人工呼吸器クリーンエア VS ULTRA 取扱説明書. 東京, フクダ電子, 2013, pp33.
- 6) 酸素加算. 医科点数表の解釈 (38版). 東京, 社会保険研究所, 2014, pp677-81.
- 7) 木村政義, 丸川征四郎：人工呼吸器の酸素使用量と経済性の検討. 日本集中治療医学会雑誌. 2000; 7: 355-9.