

完全液体呼吸用人工肺のハウジング形状とガス交換能に関する検討

Evaluation of relationship between oxygenator design

and gas exchange performance for Total Liquid Ventilation

○ 横井涼 (電機大) 日比野麻衣 (電機大) 宮城成宏 (電機大)

幡多徳彦 (電機大) 福井康裕 (電機大) 舟久保昭夫 (電機大)

Ryo YOKOI, Tokyo Denki University
 Mai HIBINO, Tokyo Denki University
 Norihiro MIYAGI, Tokyo Denki University
 Norihiko HATA, Tokyo Denki University
 Yasuhiro FUKUI, Tokyo Denki University
 Akio FUNAKUBO, Tokyo Denki University

Abstract: Total Liquid ventilation (TLV) is an effective treatment for severe respiratory failure. However, TLV still remains the problem of CO₂ removal. In this study, the membrane oxygenator for TLV (TDU-OX) was developed for CO₂ removal. In the designed TDU-OX, Perfluorocarbon (PFC) evenly flowing through the membrane portion in oxygenator, and have a low priming volume. The hollow fiber membrane of this oxygenator was used for the silicone hollow-fiber. The membrane area and the filling rate of SHF is 1.0 m² and about 45 % for housing. Gas exchange was examined *in-vitro* and was evaluated with the various PFC flow rate and V/Q ratio. Gas exchange performance of the developed TDU-OX was increased by approximately 30 % compared with the conventional oxygenator (TLV-OX). The results were suggested that the developed TDU-OX has a high gas exchange performance in TLV.

Key Words: Total Liquid Ventilation, Perfluorocarbon, Silicone hollow fiber, Oxygenator

1. 緒言

近年、呼吸器疾患患者は増加傾向にあり、その中でも特に急性呼吸窮迫症候群 (ARDS: Acute Respiratory Distress Syndrome) を発症した場合、肺胞表面に存在するサーファクタントが急激に減少し、肺胞の組織間液との間での拮抗が解け、肺胞が虚脱する。これにより、肺コンプライアンスの低下を招き、呼吸運動を行うことが困難となり、呼吸障害を引き起こし死亡するケースも少なくない。このARDSなどの重症呼吸不全に対する治療として気管内に挿管して人工呼吸器を使用した呼吸補助および体外式肺補助 (ECMO: Extracorporeal Membrane Oxygenation) を併用した治療が施される。しかし、この治療は呼吸補助を行うものであり、ARDSに陥り虚脱した状態の肺に対して直接治療を施すことができない。また、これらの治療には、膨大な時間と労力がかかり、ARDSに対する成人の生存率は低く、十分な治療効果を得ることができていないのが現状である⁽¹⁾。この問題を解決すべく、虚脱した肺胞へ直接的な治療を施すことができる完全液体呼吸 (TLV: Total Liquid ventilation) が新たな治療法としてされている。このTLVとは、気体の代わりにO₂およびCO₂の溶解度がきわめて高い液体であるPerfluorocarbon (PFC) を気道から肺内に注入し、その換液によって呼吸を維持し生体におけるガス交換を行う呼吸法である⁽²⁻⁵⁾。このPFCの酸素化、二酸化炭素除去は気泡型人工肺によりガス交換が行われているが、気泡型人工肺ではPFCの揮発やPFC充填量が多いことなどが問題として考えられる。そのため、我々は膜型人工肺を用いてガス交換を行なっている。しかし、PFCは血液と大きく異なる流体特性を持っているため、多孔質膜で作製された血液用膜型人工肺をLVに用いることは出来ない。故に、PFC特性に沿ったLV専用人工肺の開発が必要とされている⁽⁶⁾。

2. 目的

本研究では、PFCのガス交換装置として高ガス交換能を有する外部灌流型人工肺の開発を目的とし、均質膜であるシリコーン中空糸膜を用いた完全液体呼吸用人工肺を作製した。しかし、シリコーン中空糸は伸縮性が高いためPFCの流れにより中空糸が偏りや伸びを起し、ガス交換能の低下を引き起こす。そのため、中空糸膜におけるPFC流動が均一になるようなハウジング形状に関して検討を行った。また、作製した完全液体呼吸用人工肺の圧力損失およびガス移動量の測定を行なったので報告する。

3. 実験

3-1 完全液体呼吸用人工肺モデル

Fig.1に血液用人工肺のハウジングを基に作製した完全液体呼吸用人工肺 (TLV-OX) を示した。また、PFCの性状を考慮したハウジングを用いた完全液体呼吸用人工肺 (TDU-OX) を示した。TLV-OXは、PFC流入出ポートが同一直線状に位置し、その上PFC流入ポートと中空糸膜部の距離が非常に短いため、中空糸膜中心部のPFC流速が速くなり運動エネルギーも大きくなる。そのため、伸縮性の高いシリコーン中空糸では偏りや伸びが生じ、PFCのチャネリングを引き起こした。そこで、中空糸膜部でPFC流動が均一になるよう、流入出部形状を変化させ人工肺モデルを作製し数値流体解析 (CFD: Computational Fluid Dynamics) により中空糸膜部におけるPFC流動状態について検討した。解析結果より、流入部体積を大きく流入部にテーパをかけ、テーパ距離を長くすることで、PFCの運動エネルギーを低減し、また中空糸膜部のPFC流速のばらつきも低減することから、PFCを均一に流動させることが可能となった。以上より、新たな人工肺としてFig.2に示すTDU-OXを作製し、性能評価を行った。

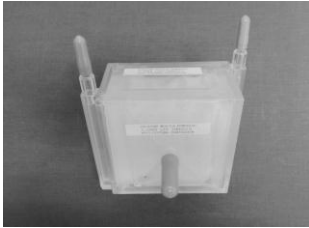


Fig.1 TLV-OX



Fig.2 TDU-OX

Table 1 Oxygenator specification

		TLV-OX	TDU-OX
Fiber OD.	[mm]	0.4	0.4
Fiber ID.	[mm]	0.3	0.3
Membrane area	[m ²]	1.0	1.0
Membrane filling rate	[%]	45.0	45.0
Priming Volume	[ml]	161.0	168.0

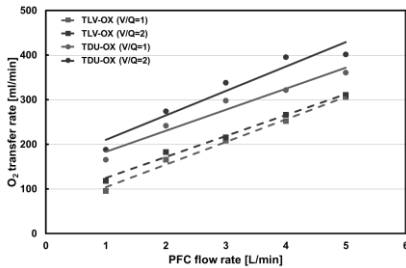
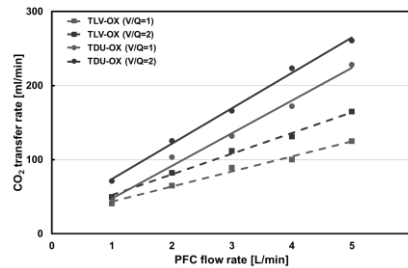
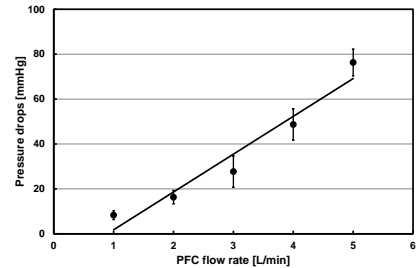
Fig.3 O₂ transfer rateFig.4 CO₂ transfer rate

Fig.5 Pressure drop

3-2 実験方法

TDU-OX の性能評価として、PFC を用いた一回通過法による *in-vitro* 実験を行なった。PFC は、酸素分圧 (PO₂) を 35±5 mmHg、二酸化炭素分圧 (PCO₂) を 45±5 mmHg に設定した。また、PFC 流量は 1.0–5.0 L/min とした。そして、100 %酸素ガスを PFC 流量に対して、1倍、2倍と変化させガス移動量を求めた。ガス分析装置は、Rapidlab348 (SIEMENS) を用いた。

3-3 実験結果

Fig.3 に PFC の酸素移動量 (TrO₂)、Fig.4 に PFC の二酸化炭素移動量 (TrCO₂)、Fig.5 に圧力損失結果を示した。

PFC 流量 5 L/min における TrO₂ は、V/Q=1, 2 のそれぞれの条件下で 360.7 ml/min, 401.5 mL/min であった。PFC 流量 5 L/min における TrCO₂ は、V/Q=1, 2 のそれぞれの条件下で 228.4 ml/min, 260.7 mL/min となった。故に、TDU-OX は TLV-OX と比較し TrO₂ および TrCO₂ 共に約 30 % 向上し、ガス交換能に関して十分な性能を有することが確認された。

4. 結語

本研究では、高ガス交換能を有する完全液体呼吸用人工肺を開発するため、シリコン中空糸膜を用い、中空糸膜部に PFC を均一に流動させるハウジング形状について検討を行った。作製した完全液体呼吸用人工肺において、ガス移動量および圧力損失の測定を行った。TDU-OX は、TLV-OX と比較し中空糸膜部における PFC のチャネリングが改善され、高いガス交換能を有することが確認された。故に、TDU-OX は完全液体呼吸のガス交換器として用いることが可能であると示唆された。

謝辞

本研究は、文部科学省科学研究費補助金(基盤研究 B, 課題番号 19300187)、文部科学省科学研究費補助金(基盤研究 B, 課題番号 23300170) および平成 20~24 年度文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業(S0801023)の研究費によって行われた。

参考文献

- (1) Sekins KM, Nugent L, Mazzone M, Flanagan C, Neer L, Rozenberg A, Hoffman J, Recent innovations in total liquid ventilation system and component design, Biomed Instrumentation Technology, 33, 277-284, 1999.
- (2) Hirschl RB, Current experience with liquid ventilation, Paediatric Respiratory Reviews 5(Suppl A), S339-45, 2004.
- (3) Robert R, Micheau P, Walti H, et al, A regulator for pressure-controlled total-liquid ventilation, IEEE Trans Biomed Eng, 57, 2267-76, 2010.
- (4) 松田兼一, 平澤博之, 先端医療を支える新しい治療法(7) 液体呼吸, 医薬の門, 40, 3, 287-94, 2000.
- (5) 清水信義, 市場晋吾, 板野秀樹ほか, 液体呼吸について, 日本胸部臨床, 55, 12, 973-77, 1996.
- (6) 佐藤耕司郎, 市川侑也, 舟久保昭夫, 福井康裕, 完全液体呼吸用人工肺の設計および開発に関する研究, 膜型人工肺研究会, 膜型肺, 29, 20-23, 2006.