

新人工肺の開発に関する研究

Study on Development of the New Artificial Lung

○東谷征弥(東京電機大院), 野中一洋(東京電機大), 福井康裕(東京電機大),
舟久保昭夫(東京電機大)

Seiya AZUMAYA, Kazuhiro NONAKA, Yasuhiro FUKUI and Akio FUNAKUBO

Graduate School of Tokyo Denki University

Key Words: Perfluorocarbon, Artificial lung, Gas Exchange performance

1. 目的

現在臨床に用いられている膜型人工肺は中空糸膜側面の微細孔と血液を接触させ、ガス分圧差を利用することでガス交換を行う原理に基づいている。そのため、長期間の使用では血液が中空糸膜側面の微細孔を浸潤することで微細孔が塞がるため、ガス交換能が低下し、長期間の使用が困難である。更に中空糸束により発生する圧力損失や剪断速度、血液の炎症反応により溶血が引き起こされ、また血流が複雑になることで生じる滞留により血栓が発生する等の多くの問題点が挙げられる^{[1][3][5]}。当研究室では従来の膜型人工肺に替わるガス交換法として血液と溶解せず、高比重、高ガス溶解度の特性を有した Perfluorocarbon(PFC)を血液と介することでガス交換を行う新たな人工肺システムを考案した^[4]。本研究では膜型人工肺の問題点を改善した新たな可能性として、中空糸膜を用いずにガス交換を行う新人工肺システムを構築するため、基礎研究として血液と PFC 間で行われるガス交換能の重要な指標に関し、検討を行ったので報告する。

2. 実験方法

本研究で使用した PFC と血液とのガス交換システムの基礎評価実験装置の外観図を Fig.1 に示す。

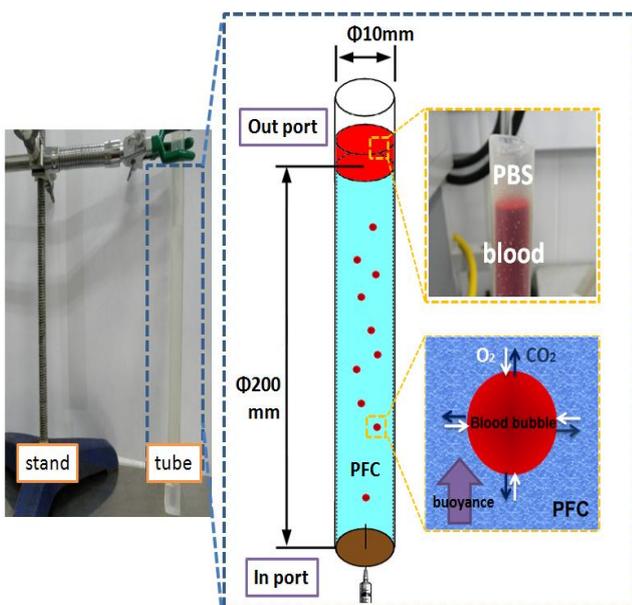


Fig.1 Fundamental evaluation system of gas exchange

本システムは PFC と血液間のガス分圧差と液々界面、比重の違いによる浮力の 3 点の特性を利用した仕組みとなっている。本実験はニードルにより生成される球状血液の径に着目し、ニードル径を変えてサンプリングを行い、ガス移動量を測定した。本実験で使用した PFC の初期条件、および標準静脈血の標準値(ヘマトクリット値、酸素ガス溶解度、炭酸ガス溶解度)を Table.1、Table.2 にそれぞれ示す。

Table.1 standard value of PFC

		standard value
PpO ₂	[mmHg]	>749
PpCO ₂	[mmHg]	<5

Table.2 standard value of venous blood

		standard value
hematocrit value [%]		36
PaO ₂	[mmHg]	35±5
PaCO ₂	[mmHg]	45±5

ニードル径より射出された血液 0.1mL の球状血液数とニードル径より射出された血液 5.0mL のガス移動量の推移について検討した。内径 10mm のチューブを使用し、チューブ内には PFC、生理食塩水をそれぞれ Φ 200、15mm 充填させた。シリンジ針のニードル径は Φ 0.40、0.50、0.60、0.70、0.80、0.90、1.10、1.20mm の 8 種類を使用し、チューブはスタンドより固定し、実験を行った。

3. 結果および考察

Fig.2 にニードル径に対する血液 0.1mL の球状血液数を示した。Fig.3、Fig.4 には血液 5.0mL の血液をニードルより射出し、PFC 内を通過させた後の酸素ガス溶解度、炭酸ガス溶解度を示した。また、Fig.3 の 30.0–40.0mmHg、Fig.4 の 40.0–50.0mmHg はそれぞれ標準静脈血の酸素ガス溶解度、炭酸ガス溶解度の標準値を表している。

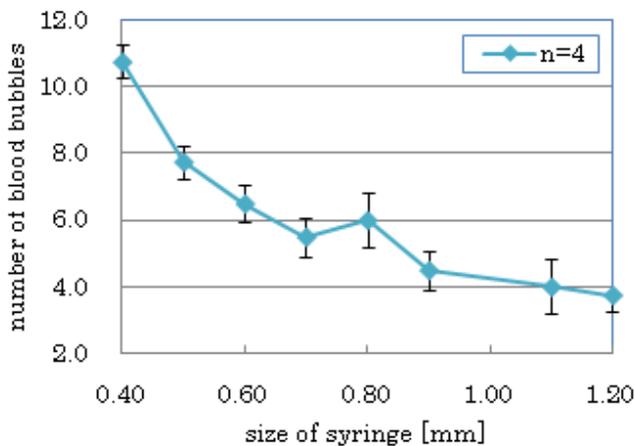


Fig.2 Relation between size of syringe and number of blood bubbles

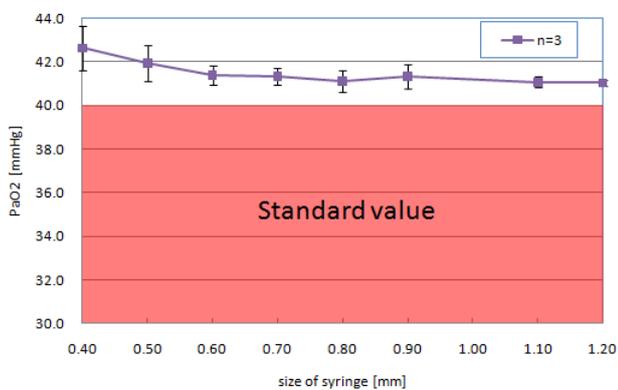


Fig.3 Relation between size of syringe and exchange of oxygen gas

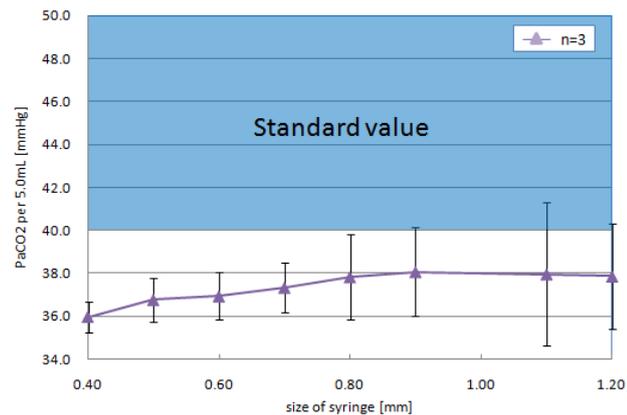


Fig.4 Relation between size of syringe and exchange of carbon dioxide gas

Fig.2 より needles径が細くなるに対して球状血液数が増加した。また Fig.3、Fig.4 より、酸素飽和 PFCΦ200mm 内に needles径より標準静脈血を射出した際のガス移動量は、 needles径 Φ0.4mm 時が最大であった。ガス移動量は標準値から計算して酸素ガス移動量は約 2.6mmHg、炭酸ガス移動量は

約 4.0mmHg であった。これによりガス移動量は needles径に依存し、 needles径が細くなるほどガス交換能が優れることが確認できた。更に PFC 内で needles径より射出される球状血液は血液の膨張により浮力が増加し生成されたこと、表面張力により PFC 内でも球形を保つことが考えられた。球状血液が needlesの外径に働く表面張力の相和については次式により表すことができる^[2]。

$$\gamma_{all} = \gamma_{hemo} \cdot S_n \quad (1)$$

ここで、 γ_{all} は needles向きの表面張力の総和、 γ_{hemo} は血液の表面張力、 S_n は needlesの外形である。(1)式より液滴が成長することで、血液に働く浮力が大きくなる。浮力が needlesの外径にかかる血液の表面張力より大きくなることで球状血液が生成される。そのため、 needles径が細くなることで needles向きの表面張力の総和も小さくなり、射出される球状血液数が増加したと考えられる。これにより PFC と接触する球状血液の表面積も増加するため、 needles径を細くすることがガス移動量の増加に関与したと考えられる。以上より、細い needles径を用いて生成した球状血液は PFC と介する表面積が増加するためガス交換能が向上すると示唆された。今回の実験では needles径の違いのみに関して言及したが、本研究では中空糸膜を PFC に代替している。このことは中空糸膜間で溶血の因子となる剪断速度や血栓形成の原因となる血液滞留を抑えることが可能であると考えられるため、今後検討していく必要がある。

4. 結論

本研究では中空糸膜を PFC に代替させた新人工肺システムについて考案し、血液と PFC 間で行われるガス交換能の新たな指標について検討を行った。酸素飽和 PFC 内に血液を流入することで異なる 2 種類の液々界面を介してガス交換を行うことが確認できた。このシステムは中空糸膜を必要とせず、圧力損失の低下や溶血を防ぐ新たな手法としての可能性が示唆された。今後は効率良くガス交換を行うシステムの構築を目指し、ガス移動時間とガス移動量の相互作用に関してより詳細な条件を設け、かつ更なる検討を行っていく。

謝辞

本研究の一部は東京電機大学フロンティア共同センター(私立大学戦略的研究基盤形成支援事業)の研究費補助金、並びに文部科学省研究費補助金基盤研究 B(課題番号 19300187)の研究費を受けて行った。

参考文献

- 1) 舟久保昭夫、福井康裕:“赤血球可視化による血液の流れの解析と血栓形成の検討”医用電子と生体工学第 30 巻第 4 号 pp.282-289,1992.
- 2) 小野 哲 章 :”Clinical Engineering vol19 No.2 ” pp.140-141 ,2008.
- 3) Yasuda T , Shimokasa K , Funakubo A ,Higami T , Kawamura T , Fukui Y : An Investigation of Blood Flow Behavior and Hemolysis in Artificial Organ. J Artif Organs 2000 ; 527-531.
- 4) 小林紘一:”Liquid Ventilation” Progress in Medicine vol.20 No.11 2000.
- 5) Yasuda T , Funakubo A , Fukui Y : An Investigation of Blood Damage Induced by Static Pressure During Shear-Rate Condition . J Artif Organs 2002 ; 26(1) : 27-31.