

静脈リザーバー内の薬液濃度変化に関する研究 -循環回路における薬液濃度変化の測定-

北口 郁里弥, 笹倉 和馬, 淀川 雄大

キーワード 人工心肺装置, 静脈リザーバー, 塩化カリウム水溶液, 濃度変化, 循環回路

1. 背景・目的

心臓大血管外科手術では、心静止と無血視野確保のため、人工心肺装置を用いて血液を体外循環させる。これにより患者の呼吸・循環が代行され患者の生命は維持される [1]。体外循環に用いられる人工心肺装置には、送血量を確保し循環血液量を調節するために静脈リザーバーが用いられる [2]。静脈リザーバーは、手術中の薬液注入ポートとしての役割があり、患者に生理的変化が見られたときに様々な薬剤の注入がされる。静脈リザーバーを対象にした研究について、いくつかの報告があるが、静脈リザーバー内の薬液濃度希釈に関する研究は十分ではない [3-5]。人工心肺装置の回路は人体を介する体外循環回路となっていることから、本研究では、静脈リザーバーに注入された薬液が循環回路内で希釈されるときに濃度時間変化を測定した。このとき、静脈リザーバーが薬液濃度に及ぼす影響を見るために、循環回路を静脈リザーバーと送液用のローラーポンプのみで構成した。また、質量保存則 [6] を基に理論モデルを立て、実験結果と比較からその妥当性について調べた。

2. 理論モデル

本研究では図 1 のように、単純化したモデルを基に理論を考えた。静脈に注入する薬液の濃度を C_D 、送液流量を Q_D とし、静脈リザーバーから流出する薬液濃度を C 、送液流量を Q とした。また、静脈リザーバーの液面レベルを V 、経過時間を t とした。リザーバー内に流入した薬液は、瞬時にリザーバー全体には拡がらないと考えられるため、薬液が瞬時に拡がることのできる領域を有効体積として αV (α を有効係数とする) とした。

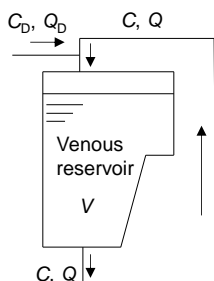


図 1 単純化理論モデル

質量保存則を基に微分方程式を立て、静脈リザーバー内初期濃度を 0 とし、微分方程式を解くと、静脈リザーバー

から流出する薬液濃度 C は、

$$C = At \quad (1)$$

$$A = \frac{C_D Q_D}{\alpha V} \quad (2)$$

で表され、濃度は時間経過に比例して増加することがわかった。本研究では濃度の時間変化率を A とおいた。

3. 実験装置と方法

本実験で用いた循環回路の概略図を図 2 に示す。作動流体に室温の水道水を用いた。図 2 において、静脈リザーバー (Maquet Cardiopulmonary GmbH, VHK71000) に溜められた水は、ローラーポンプによって送液されて回路内を循環する。薬液には塩化カリウム水溶液を用い、その濃度を 75 g/L とし、シリンジポンプで静脈リザーバー上部の脱血管から 1200 mL/h で注入した。塩化カリウム水溶液の投与量を 0.05 L、投与時間を 150 s とした。実験では、循環回路内のカリウムイオンの電気伝導度を電気伝導度計 (HORIBA.LAWWA WQ-330.WQ330) で測定し、測定結果を濃度に換算した。

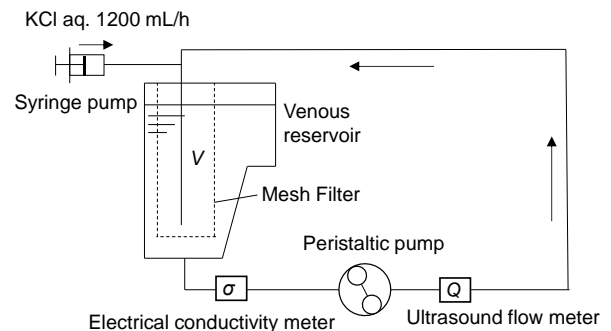


図 2 実験装置概略図

本研究では、静脈リザーバーレベル $V=0.1, 0.3, 0.5, 1.0, 2.0$ L において、流量を $Q=1, 2, 3, 4, 5, 6$ L/min で変化させたときの電気伝導度を 3 回ずつ測定した。

4. 結果と考察

流量 4 L/min 時の各リザーバーレベルにおけるカリウムイオン濃度変化を図 3 に示す。図 3 において、薬液注入中のリザーバー内のカリウムイオン濃度は、ほぼ直線的に上昇した。注入後は、リザーバーレベルが低いと濃度は一定であったが、リザーバーレベルが高くなると曲線的に濃度は減少しやがて一定に収束する傾向が見られた。

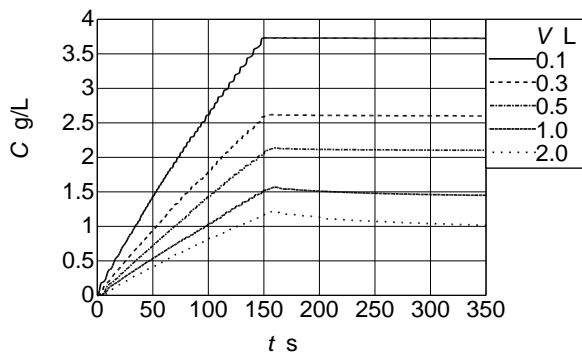


図3 流量4 L/minにおける時間と濃度の関係

薬液が回路内全体に拡がった場合の濃度を C_t として、各実験条件での収束濃度 C_{end} との比を取ったグラフを図4に示す。このとき、 C_t はリザーバーと配管内の全容液量で算出した。図から、 C_{end}/C_t はおよそ1となるが、低流量においては $V=2L$ などリザーバー内液量が高いほど、 C_{end}/C_t が高くなる傾向が見られた。リザーバー内では脱血管からの流れによる攪拌によって薬液が拡がると考えられる。このため、液量が大きく流量が小さい場合、攪拌能力が他に比べて低くなり、収束濃度が高く測定されたと考えられる。今回の実験では、薬液注入後およそ60秒で測定を終了したが、より長い時間の測定をすれば、 C_{end}/C_t は1となると予想される。

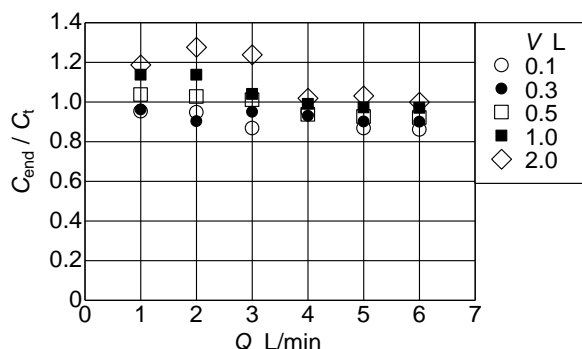


図4 収束濃度比と流量の関係

薬液注入中の薬液濃度の時間変化率 A とリザーバーレベル V の関係を図5に示す。図5からリザーバーレベルの増加に伴い、濃度の時間変化率は曲線的に減少することがわかった。理論式(2)においても濃度の時間変化率はリザーバーレベルに反比例しており、この傾向が実験結果に反映されたと考えられる。

傾き A をもとに有効係数 α を算出した結果を図6に示す。図中の V_{total} は、リザーバー内とその他の配管内を含む回路内液量を表す。図6から V_{total} が小さい場合に α はおよそ1に近いが、 V_{total} が大きくなると α は1を下回り、0.5を下回る条件も見られた。有効係数 α は、理論モデルにおいて薬液が瞬時に拡がる体積割合を表しており、これは脱血管からの流れによる攪拌の影響を示すと考えられる。そのた

め、 V_{total} が大きく、 Q が小さい条件になるほど、流れによる攪拌能力は低下するため α も低下したと考えられる。リザーバー内の流れの様子は、その形状などにも依存する可能性があるため、今後検討が必要である。

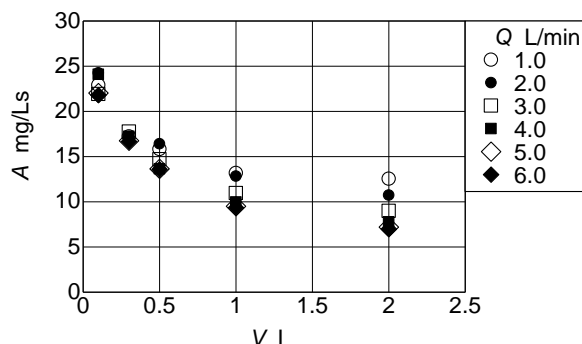


図5 薬液濃度時間変化率とリザーバーレベルの関係

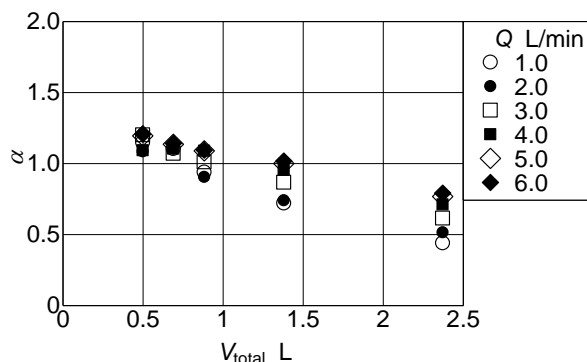


図6 薬液濃度時間変化率とリザーバーレベルの関係

以上から、理論モデルは実験結果に沿ったものであることがわかった。今回は最も単純化された回路における理論並びに実験回路もとに研究がなされたが、臨床現場においては、生体並びに人工肺などの様々な要素が加わる。今後は、それらに合わせた条件を組み込むことで、より現実的な条件下で静脈リザーバーから流出される薬液濃度変化について理論的かつ実験的に調べることができると考えられる。

5. おわりに

本研究では、循環回路における静脈リザーバー内に薬液を注入した際の、リザーバーから流出する薬液濃度を測定した。その結果、以下のことがわかった。

- 1) リザーバーから流出する薬液濃度が時間経過に伴い直線的に上昇し、この傾向は理論モデルに一致した。
- 2) リザーバーレベルが増加すると薬液濃度の時間変化率は低下した。
- 3) 送液流量が増加すると薬液濃度の時間変化率は上昇した。

参考文献

- [1] 見目恭一, 福永一義: 臨床工学講座 生体機能代行装置 体外循環装置 第2版, 医歯薬出版株式会社, 東京, p.1, 2022.
- [2] 見目恭一, 福永一義: 臨床工学講座 生体機能代行装置 体外循環装置 第2版, 医歯薬出版株式会社, 東京, p.46, 2022.
- [3] 中村淳史, 四倉正之: 人工心肺に使用される静脈リザーバの血流解析, 杏林医会誌 53 巻1号, pp. 3-10, 杏林大学保健学部臨床工学科, 2022.
- [4] 中村淳史, 木暮英輝, 井上将, 桑名克之: 電氣的測法による静脈リザーバレベル測定の検討, 体外循環技術 Vol50 No1, pp.11-18, 2023.
- [5] Kohri S, Matsuda K, Hatanaka Y, Hatanaka A: Influence on the concentration of drug solution in a venous reservoir by the change of flow rate of a blood pump, Journal of Biorheology, Vol.37, No.2, 2023
- [6] 大場謙吉, 板東潔: 流体の力学 —現象とモデル化— 第10刷, コロナ社, 東京都, pp.36-38, 2022.

指導教員

藍野大学 医療保健学部 臨床工学科
郡 慎平