# 陰圧吸引補助脱血（Vacuum Assisted Venous Drainage：VAVD）およびリザーバーレベルが与える遠心ポンプ前負荷への影響の検討

前田　智基

**概要**

VAVD が遠心ポンプの流量へ与える影響は明らかではない．リザーバー内圧（0～-40 mmHg）とリザーバーレベル（0～4000 mL）を変化させたとき遠心ポンプ流入口圧や流出口圧，流量について検討した結果，遠心ポンプ流入圧は流れが静止状態のとき最小で-27 mmHg，流れがある状態では流入圧が最小で-16 mmHg まで低下したとき流量変化は最大で 50.2%の低下を示したことから，VAVD 圧は患者・静脈リザーバーの高さ関係が同じでもポンプ流量に影響を与える要因であることが明らかとなった．VAVD 操作により遠心ポンプ流量は変化することから，それを考慮した人工心肺操作を行う必要があると考えられる．

**キーワード**　Vacuum Assisted Venous Drainage，遠心ポンプ，リザーバーレベル，前負荷，遠心ポンプ流量

## 1.　背景

人工心肺の静脈脱血法の一つである落差脱血（Gravity Drainage : GD）を補助する目的で陰圧吸引補助脱血（Vacuum Assisted Venous Drainage : VAVD[1]）が使用される．壁式吸引から静脈リザーバー内に陰圧をかけることで，脱血回路内の血液を静脈リザーバー内に引き込み脱血流量を補助する．調査[2]によると VAVD を使用している施設は 394 施設のうち 52.6%で，送血ポンプに遠心ポンプを採用している施設は 46.2%，場合によって使い分けるのが 28.2%であった．このことから，静脈リザーバーと遠心ポンプを組み合わせた状態で VAVD を使用しているのは心臓血管外科手術を実施している施設の約半数に上ると予想される．また，遠心ポンプ流量は揚程圧（前負荷と後負荷の差）や回転数に依存するとされている[13]．一方で，VAVD の陰圧が遠心ポンプ流量へ与える影響については明確なデータは存在せず，検討されていない．

## 2.　目的

静脈リザーバーと遠心ポンプを組み合わせたとき VAVD 使用時およびリザーバーレベルが遠心ポンプ前負荷および流量へ与える影響を明らかにすること．

## 3.　方法

### 3.1　回路構成

静脈リザーバー（VR：ソーリングループ社 インスパイア HVR），遠心ポンプ（CP：ソーリングループ社 Revolution），人工肺（MO：ソーリングループ社，インスパイア 8F）を循環する回路を作製した（図 1）．流量計（FM：ソーリングループ社 Deutschland GmbH）は Tb3 に装着した．圧トランスデューサー（Edwards 社モニタキット）を用いて Tb4，CP 流入口チューブおよび CP 吐出口チューブ内に生じた圧を測定した．圧モニタとしてソーリングループ社のスタッカート S5 4 スロット・システムパネルを使用した．VAVD をする手段として本来は壁式吸引と VAVD コントローラーを用いるが，本実験では人工心肺装置付属のローラーポンプ（ソーリングループ社 S5 ローラーポンプ 150）によりリザーバー内に陰圧を加えた．

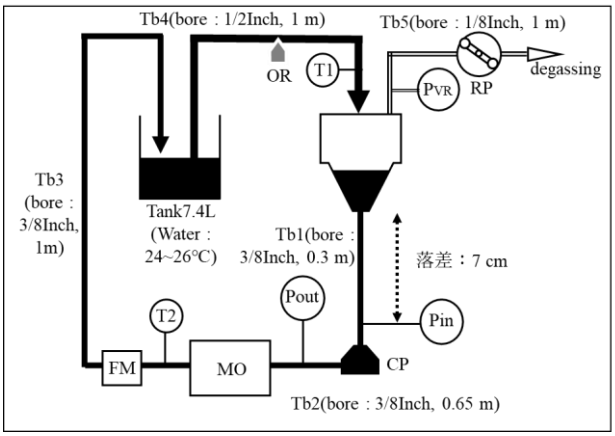


図 1　実験回路の構成

図 1 の回路構成について以下に示す．また，文中において回路の構成要素は略語を使用する．回路に使用したチューブ（以下，Tb）はポリ塩化ビニル製である．MO : 人工肺（ソーリングループ社，インスパイア 8F）．Tb1 : VR 出口と CP 入り口を接続，Tb2 : CP 出口と MO 血液流入口を接続，Tb3 : FM 血液吐出口と Tank7.4L に留置，Tb4 : Tank7.4L から VR 入り口を接続，Tb5 : VR 脱気ポートに接続し RP に取り付けた．OR : 電動静脈オクルーダー（リヴァノヴァ社製，S5-EVO）．

### 3.2 リザーバーレベルを変化させたときの遠心ポンプ流入圧の推移

水道水を用いてリザーバーレベルを 0~4000 mL まで 100~150 mL 間隔で増加させたとき, 遠心ポンプ流入圧（以下, Pin）を測定した．ポンプ流量（以下，Q）は 0 L/min で固定した．Pin の測定部位とリザーバーレベル 0 mL に 7 cm の落差を設けた. x 軸に PVR, y 軸に Pin のグラフを作成した. Pin の理論値を式（1）から算出した.

$$Pin = h \times \rho \times g \qquad (1)$$

Pin の測定位置の高さを基準としたときリザーバーレベルの水面を h [m]，水の密度$\rho$：1000 kg/m³，重力加速度$g$：9.8 m/sec² とした.

実測値 Pin は人工心肺装置付属のモニタ（4 スロット・システムパネル）に表示される値を目視し記録した．実測値 Pin と比較検討する．実測値 Pin と理論値 Pin を$\chi 2$ 検定により比較し，P<0.05 を有意差ありとした.

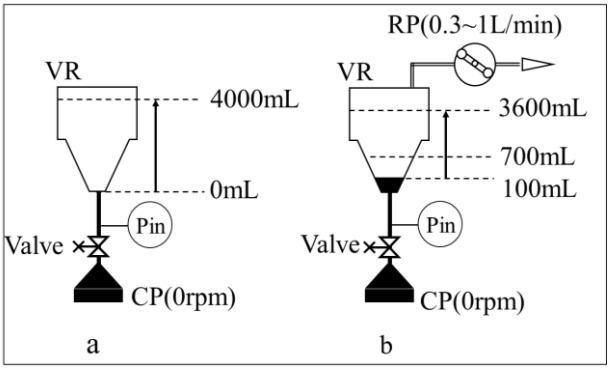


図 2　基礎実験回路

CP の血液流入ポートと Pin の測定部位の間を遮断する（図 2-a）．ローラーポンプ（RP）の流量は 0.3 L/min から 1 L/min の範囲で回転させ，PVR の調節をした．静脈リザーバーは大気開放状態とした.

### 3.3 リザーバー内圧およびリザーバーレベルを変化させたときの遠心ポンプ流入圧の推移

PVR を 0 ~ -40 mmHg まで低下させたとき，Pin を測定した．PVR は-1 mmHg 間隔で低下させた．Q は 0 L/min で固定した．x 軸に Pin，y 軸に PVR のグラフを作成した．リザーバーレベルを 100 mL，700 mL，3600 mL と変化させた．V や PVR が変化したとき遠心ポンプ入り口への影響を検証するため, 遠心ポンプ流入ポートと Pin 測定部位の間を遮断した(図 2-b)．RP は 0.3 L/min から 1 L/min の範囲で調節した.

### 3.4 リザーバーレベルごとにとリザーバー内圧を変化させたとき遠心ポンプ流入圧，回転数および流量の推移

PVR を 0~-30 mmHg まで変化させたときの Pin，Pout，CP の回転数および CP の吐出量を測定した. PVR は-1 mmHg 間隔で低下させた.

PVR が 0 mmHg のとき脱血量を得るため Tank7.4L の貯液水面とリザーバーレベル 150 mL（脱血管の先端）の位置に 0.6 m の落差を設けた．PVR を 0 mmHg（リザーバー内を大気開放とした状態）の状態で V が 1000 mL，2000 mL のとき遠心ポンプ吐出量を 3.4±0.1 L/min とした．リザーバーレベルを一定に保つためオクルーダー（OR）を用いて脱血流量の調節を行った．V を 1000 mL や 2000 mL で固定し PVR を低下させたときの Pin，Pout，流量を測定した．V が 1000 mL のときの流量を Q1，V が 2000 mL のときの流量を Q2 とした. Student t 検定を用いて Q1 と Q2 の 2 群間を比較し，P<0.05 を有意差ありとした.

## 4. 結果

### 4.1 リザーバーレベルを変化させたときの遠心ポンプ流入圧の推移

V を 0 ~ 4000 mL まで増加させたとき実測値 Pin は 7 mmHg から 16 mmHg の増加があり最高で 23 mmHg となった．Pin とリザーバーレベル 0 mL まで 7 cm の落差を設けたため V が 0 mL のとき圧が測定された.

実測値 Pin と理論値 Pin を比較したところ有意差を認めなかった（P>0.05）．実測値と理論値の多項近似線から相関係数（以下，$R^2$）を求めたところ実測値 Pin の$R^2$は 0.91，理論値 Pin の$R^2$は 0.93 と両群において強い正の相関が見られた.

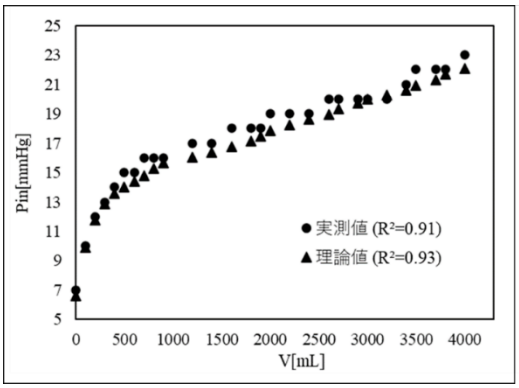


図 3 リザーバーレベル（V）を変化させたときの遠心ポンプ流入圧（Pin）の推移

### 4.2 リザーバーレベルとリザーバー内圧を変化させたときの遠心ポンプ流入圧の推移

Pin の最小は V が 100 mL，PVR を-40 mmHg まで低下させたとき-27 mmHg となった.

図 4 から PVR と Pin には比例関係があり, V が 100 mL のとき比例係数は 0.91 [-]，V が 700 mL のとき 0.94 [-]，V が 3600 mL のとき 0.97 [-] であった．PVR の比例係数は V によって異なる結果となった．比例係数を $b$ [-]としたとき PVR と Pin の関係は式（2）となる.

$$Pin = bx + \rho gh \qquad (2)$$

$b$：V ごとの比例係数 [-]，$x$：PVR mmHg，水の密度$\rho$：1000 kg/m$^3$，重力加速度 $g$：9.8 m/sec$^2$，$h$：Pin 測定部位からリザーバー水面までの高さ m.

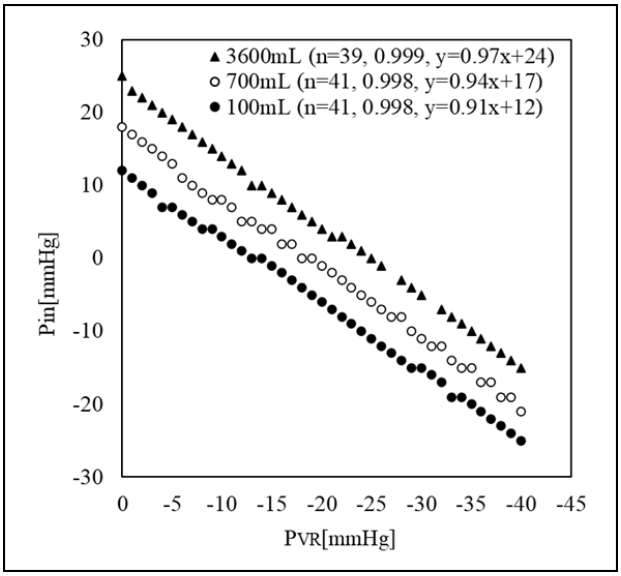


図 4 リザーバー内圧（PVR）およびリザーバーレベル（V）を変化させたときの遠心ポンプ流入圧（Pin）

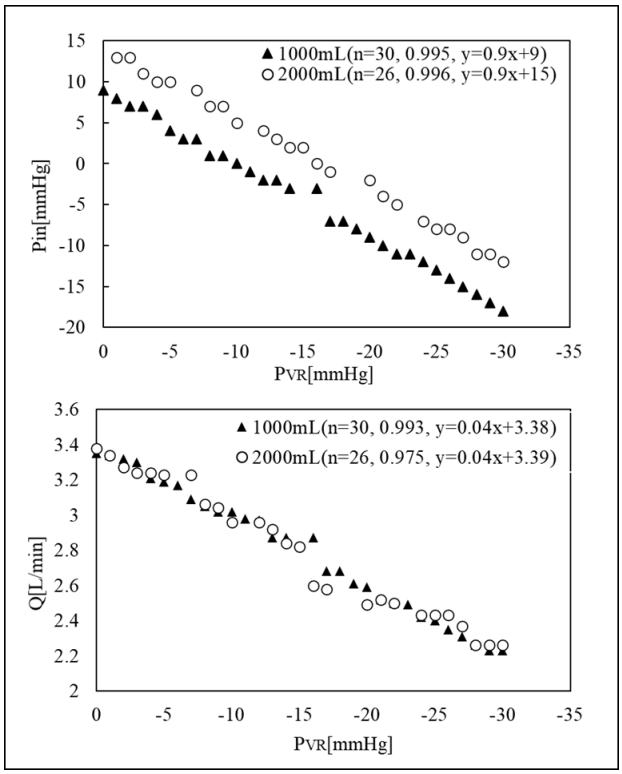


図 5 リザーバー内圧を変化させたときの遠心ポンプ流入圧（Pin）・吐出圧（Pout）および吐出量

### 4.3 リザーバーレベルとリザーバー内圧を変化させたとき遠心ポンプの流入圧，吐出圧，流量の推移

PVR を 0 から -30 mmHg まで低下させたとき，V が 1000 mL のとき Pin は 16 mmHg から 28 mmHg 低下（減少係数 0.4）して-12 mmHg，V が 2000 mL のとき Pin は 14 mmHg から 28 mmHg 低下（減少係数 0.9）して-13 mmHg となった．V を 1000 mL，CP の回転数を固定，PVR を 0 mmHg から-30 mmHg まで低下させたとき，Q1 は 3.35 L/min から 50.2% 低下して 2.23 L/min．となり減少係数は 0.04 L/min/mmHg，V が 2000 mL のとき Q2 は 3.38 L/min から 49.6%低下して 2.26 L/min となり減少係数 0.04 L/min/mmHg であった．また遠心ポンプ揚程圧（Pout-Pin）は Q1 のとき 79±2 mmHg，Q2 のとき 80±2 mmHg であった．

Q1（n=30）と Q2（n=26）の 2 群間を比較したところ P 値は 0.986 となり有意差を認めなかった．

## 5. 考察

### 5.1 リザーバーレベルを変化させたときの遠心ポンプ流入圧の推移

これまで CP と VR を組み合わせた回路において，遠心ポンプ流入口へ与える前負荷は明らかにされていない．式（1）より算出した理論値 Pin と実測値 Pin を比較したところ有意差は認められなかった（P>0.05）．そのことから Pin はリザーバーレベルの高さに比例した圧（水圧：$\rho gh$）が作用すると証明された．今回使用したリザーバー（インスパイア HVR）のレベルを 0 mL から最大 4000 mL にしたとき Pin は 16 mmHg の増加を認めた．一方で，遠心ポンプの特性[9]から遠心ポンプ揚程圧 100 mmHg あたりに生じる流量変化は約 9.0 L/min（約 0.09 L/min/mmHg）であるため 16 mmHg (V を 0 から 4000 mL 増加させたときの Pin の変化量) あたり 1.44 L/min の流量変化が生じることになり，これは人工心肺灌流量 3.84 L/min（日本人の平均体表面積 1.60 m$^2$（n=45）[11]と灌流指標 2.4 L/min/m$^2$ [12]より求めた値）の 37.5%の流量変化となる．このことからリザーバー液面の高さが最大変化したとき遠心ポンプ流量へ与える影響は決して無視できるものではないと考えられる．そのためリザーバーレベルの高さ変化を大きく変化させる操作はできるだけ避けるべきだと考える．

今後，リザーバー液面の高さが変化したときの遠心ポンプ流量への影響を明らかにする必要がある．

### 5.2 リザーバーレベルとリザーバー内圧を変化させたときの遠心ポンプ流入圧の推移

V を 1000 mL，PVR を-40 mmHg まで低下させたとき Pin の最小値は-27 mmHg であった．実際の人工心肺操作では送血カニューレ挿入時や大動脈遮断を行う際に一時的に送血回路をクランプし送血量を低下させ，遠心ポンプ揚程圧が増加する．その操作を行う際，遠心ポンプ入り口圧 Pin は VAVD の陰圧に加えて，CP の回転によって引き込みが生じ

ることになり，さらなる Pin 低下を招くと考えられる．森らの報告[11]によると，陰圧は陽圧よりも溶血を招くと要因とされており，-80 mmHg より強い陰圧では溶血の可能性[2]が示唆されている．Pin の陰圧を抑制することは溶血発生を予防できると考えられることから Pin が過剰に低下する可能性のある送血回路クランプを行う操作では，V を高くすることや CP 回転数を低下，VAVD を一時的に停止するなどの操作を行うことで，Pin 低下を緩和できると考えられる．

今後，VAVD 併用時に送血回路クランプ操作を行った際の Pin を明らかにする必要がある．

### 5.3 リザーバーレベルとリザーバー内圧の変化させたとき遠心ポンプの流入圧，吐出圧，流量の推移

VAVD の目的は脱血流量の補助[1]であり，遠心ポンプ吐出量は後負荷に依存する[8]とされる．PVR を 0~30mmHg まで低下させたとき，V が 1000 mL のとき Pin は 28 mmHg 低下し Q は 50.2%低下，V が 2000 mL のとき Pin は 25 mmHg 低下し Q は 49.6%低下する結果であった．人工心肺操作では，VAVD により低下した送血量を補うために，遠心ポンプの回転数を上げる[6]．目的の送血量を確保できる一方で，CP の回転数増加に伴う CP 入り口の引き込みにより Pin はさらに低下すると考えられる．つまり負荷変動により Q を補正すると同時に，Pin はさらに低下すると考えられる．一方で，今回はQ補正を行っていいないため，Q 補正時の Pin を測定する必要がある．

これまで遠心ポンプは後負荷の変化に伴い Q を得られる[8]ことが知られていたが，今回の実験から VAVD は，遠心ポンプ前負荷の低下に加えて，流量低下（減少係数 0.09 L/min/mmHg）を及ぼす要因であることが明らかとなった．

人工肺の抵抗は血液の粘性の影響を受ける[13]．本実験では，人工肺の送血圧を測定しておらず，人工肺の抵抗による流量変化について検討できない．本実験の実験方法に加えて，送血圧を測定することで人工肺の流路抵抗を踏まえた遠心ポンプ流量検討する必要があると考える．

遠心ポンプ流量は血液の粘性変化により変化する[12]とされている．一方で，本実験では水（ニュートン流体）を使用したため血液に近い流体を用いた検証も必要だと考える．

今回は陰圧発生源として臨床とは異なるローラーポンプを用いたが，臨床と同じ装置を用いた実験での検討が必要である．

## 6. 結論

VAVD とリザーバーレベルが遠心ポンプ前負荷へ与える影響について調査した．

遠心ポンプ流量 0 L/min のとき遠心ポンプ流入圧は，リザーバー液面の高さと VAVD の陰圧に相関することが明らかとなった．リザーバー液面の高さが変化することによる遠心ポンプ流量への影響は無視できるものではないと考えられるため今後検討する必要がある．

VAVD を強めて静脈リザーバー内圧を-30 mmHg まで低下させたとき遠心ポンプ流入圧は減少係数 0.9[-]および流量は，0.04 L/min/mmHg と低下する傾向を示した．

今回の実験結果から患者・貯血層・ポンプの位置関係（高さ）が同じでも VAVD 圧がポンプ流量に影響を与える要因である．

## 参考文献


[1] Paul J. Chai：人工心肺その原理と実際．pp. 681-690，2010.

[2] 高井浩司：人工心肺における安全管理の現状—JaSECT アンケート 2013 のインシデント報告より—．体外循環技術，Vol. 42，No. 3，pp. 381-392，2015.

[3] 吉田靖，山田憲嗣：人工心肺事故の現状と安全対策環境整備．人工心肺・補助循環の安全，pp. 228-231，2013.

[4] 工藤英範：遠心ポンプの血球破壊および熱発生と臨床使用経験．人工臓器，Vol. 21，No. 1，pp. 116-122，1992.

[5] 又吉徹：落差脱血・開放型回路ではない人工心肺とその留意点ー陰圧吸引補助脱血と閉鎖回路ー．人工臓，Vol. 3，No. 3，2005.

[6] Sibel Aydin : The effect of vacuum-assisted venous drainage on hemolysis during cardiopulmonary bypass. Am J Cardiovasc Dic, Vol. 10, No. 4, pp.473-478, 2020, https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7675161/#, (閲覧日：2021/9/30)

[7] ゲティンゲグループ・ジャパン株式会社（2006），VHK 静脈ハードシェルリザーバー　新生児・小児用-Pmda. https://www.info.pmda.go.jp/downfiles/md/PDF/630376/630376_222AIBZX00045000_A_01_05.pdf，閲覧日：2021/10/25.

[8] Filip M.J.J. De Somoer, Guido van Nooten：人工心肺に用いる血液ポンプ．人工心肺その原理と実際，pp. 35-45，2010.

[9] D Goksedef : Hemolysis at different vacuum levels during vacuum-assisted venous drainage : a prospective randomized clinical trial. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21789761/，（閲覧日：2021/11/9）

[10] 森康：心腔内吸引装置による溶血に関する研究，札幌雑誌，Vol. 46，No. 6，pp. 448-457，1977.

[11] 藏澄美仁：日本人の体表面積に関する研究，日本気誌，Vol. 31，No. 1，pp. 5-29，1994.

[12] 岡村直哉：遠心ポンプ圧ー流量特性による心負荷モニタリングの可能性．Jpn J Extra-Corporeal Technology，Vol. 38，No. 4，pp. 503-505，2011.

[13] リヴァノヴァ株式会社：”インスパイア”．2017. https://www.info.pmda.go.jp/downfiles/md/PDF/390059/390059_22600BZI00011000_A_01_01.pdf，（閲覧日：2022/3/28）



指導教員

藍野大学医療保健学部臨床工学科

山﨑　康祥