

遠心ポンプの歴史と現在

大塚 徹、諏訪 邦夫
帝京短期大学専攻科臨床工学専攻

The history and the present of the centrifugal pump

Toru Otuka, Kunio Suwa

Abstract

As for the study as the blood pump of the centrifugal pump which came to be used many for open heart surgery use, the thing of Hall and others of 1958 seems with the thing that the documents top is the oldest. The development study of the centrifugal pump for blood circulation came to be conducted in earnest by Bernstein, Dorman and others and Rafferty, two group of Kletchka and others from the late 60s. Sale was started as BioPump in 1974 by Bio-Medicus company. BioPump was used as supporting circulation use at first. It comes to be used many for open heart surgery use mainly led by the United States from the late 1980s, and this pump is used near 50% of open heart surgery now in the United States.

要 旨

開心術用として多用されるようになってきた遠心ポンプの血液ポンプとしての研究は、1958年のHallらのものが文献上は最も古い物と思われる。60年代後半よりBernstein、Dormanら、およびRafferty、Kletchkaらの2つのグループにより血液循環用遠心ポンプの開発研究が本格的に行われるようになった。1974年にバイオメディカス社からBioPumpとして販売が開始された。BioPumpは、当初補助循環用として使用されていた。1980年代後半から主に米国を中心として開心術用として多用されるようになり、現在米国では開心術の50%近くに本ポンプが使用されている。

1. 遠心ポンプの歴史

開心術用として多用されるようになってきた遠心ポンプの血液ポンプとしての研究は、1958年のHallらのもの¹⁾が文献上は最も古い物と思われる。その後、1960年のSaxsonらの文献²⁾において、小型、高効率、繰り返し変形による部材の疲労がないこと等が置換型人工心臓として理想的であることが指摘され、60年代後半よりBernstein、Dormanら、およびRafferty、Kletchkaらの2つのグループにより血液循環用遠心ポンプの開発研究が本格的に行われるようになった。

遠心ポンプの開発の初期の段階では、羽根車を回転させる方法が検討されたが、血球の破壊が強く、臨床応用に至らなかった。その後、溶血を少なくする改良がなされ、Golding³⁾らにより臨床応用された。

遠心ポンプは、1974年にバイオメディカス社からBio Pumpとして販売が開始された。本ポンプは当初補助循環用として使用されていたが、1980年代後半から主に米国を中心として開心術用として多用される

ようになり、現在米国では開心術の50%近くに本ポンプが使用されている。このような遠心ポンプの需要増加に伴い、1990年代には参入メーカーが相次ぎ、現在では国内メーカー2社を含む5社が遠心血液ポンプを製造している。

日本体外循環技術医学会教育委員会・安全対策委員会が、2010年度に行った、心臓血管外科基幹・関連施設の446施設にたいするアンケート（回答数296施設）において、遠心ポンプのみを使用している施設が、134施設（45.3%）であった⁴⁾。

2. 遠心ポンプの原理と構造

2.1 遠心ポンプの原理

遠心ポンプは、渦巻きポンプとも呼ばれる。回転運動によってものが、遠くへ飛び出そうとする力を、遠心力という。渦巻ポンプの吐出作用も、この遠心力によって行われる。渦巻ポンプの中に水が満たされると、インペラーが、回転したときに生じる遠心力によって、水が外側に押しやられ、外周の圧力が上がる。一方、吐出側が、常圧であれば、遠心力で高圧と

なった外周部の水が、常圧のままのその先に流れ出る。外周部が、遠心力の作用で高圧になるが、インペラの中心付近は遠心力がほとんど作用しないため、圧力も上昇しない。外周からは、渦巻ポンプ内の水が、どんどん流れ出ているので、それに引っ張られるような形で、入り口から渦巻ポンプ内に、水が流入してくる。ここで、引っ張られるように、水が入ってくるため、入口での圧力は、常圧よりも下がるが、逆に出口を絞って（流れづらくする）水の流出を少なくしてゆくと、引っ張る作用が小さくなってゆき、圧力は常圧に近くなって来る。つまり、入口の流量は、出口の流れづらさに左右される。このようにして渦巻きポンプ内のインペラが、回転することによって、ポンプ内の水の出入りが行われる、すなわちポンプとして機能する。渦巻ポンプは、遠心力を利用しているので、水などでは、遠心力が発生するが、気体では、遠心力が発生しない。このような渦巻ポンプ（遠心ポンプ）の特徴をまとめると、次のようになる。

1. 渦巻ポンプは、インペラの回転により生じる水の遠心力を利用している。
2. 遠心力で外周が高圧になり、外部に水が吐出される。
3. 中心は遠心力が作用せず、吐出される水に引っ張られて低圧になる
4. 低圧になった中心部から水が吸い込まれる。
5. 出口との圧力は、入口の流量を左右する。
6. 渦巻ポンプ（遠心ポンプ）内が気体で満たされると、遠心力が発生しないので、出口に気体を流すことは、少ない。

2.2 遠心ポンプの構造

現在、臨床で使用されている遠心ポンプは、回転する2～3枚の円錐（コーン）面間の粘性摩擦により、血液を、引きずり回すことで、遠心力を発生させる（図1-1）粘性摩擦型と、羽根車により強制的に血液を回転させることで、遠心力を発生させる羽根車型（インペラー型）の2種に分類され、羽根车型は羽根車の形状により直線羽根型（図1-2）、曲線羽根型（図1-3）、直線流路型（図1-4）がある。

コーン型^{5) 6)}は、羽根車を持たないので、溶血が少ないということで、臨床的に広く利用されて、現在に至っている。しかし、その後に幾つかのインペラー型の遠心ポンプが工夫開発され市販された。両者を比較すると、コーンの回転によるものは、渦流を造るのに早い回転が必須であるが、インペラー型の遠心ポンプでは、より少ない回転数で拍出が可能であり、かつ低回転でも運転できる長所があり、また低容量のポンプの制作が可能である。最近のインペラー型の遠心ポ

図1-1 粘性摩擦型遠心ポンプ Bio-Pump (BP-80)

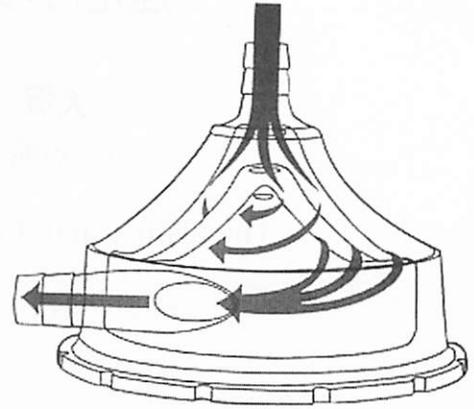


図1-2 直線羽根型遠心ポンプ Delpin

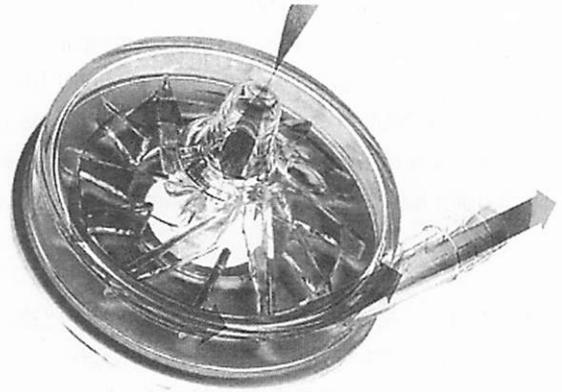


図1-3 曲線羽根型遠心ポンプ

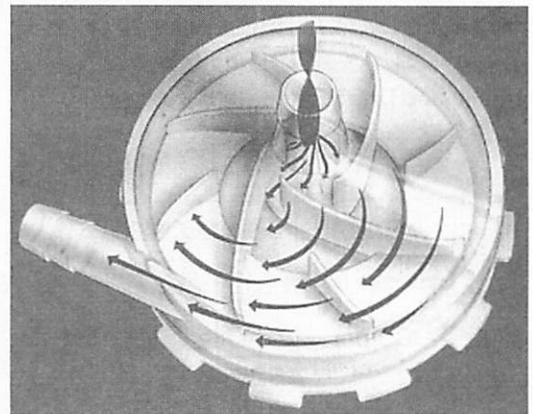
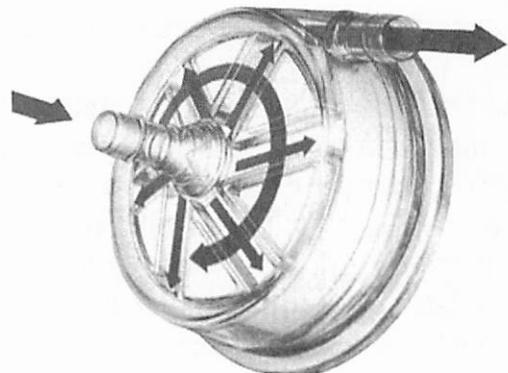


図1-4 直線流路型ポンプ SP45

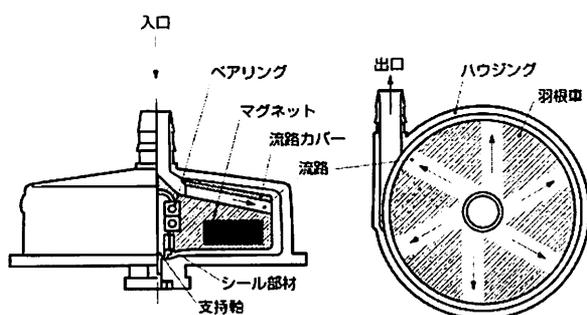


ンプでは、インペラー型であるために溶血が多いということはない。

これらの遠心ポンプは、最近では表面をヘパリン加工したものが市販されるようになり、血液諸性状に及ぼす影響がより少なくなっている。

どの型を用いた遠心ポンプも、遠心ポンプの回転部分とモーターの回転とは、遠心ポンプの回転部分に内蔵されたマグネットが、間接的にモーターに直結されたマグネットと磁気結合（マグネットカップリング）することで、回転動力を伝達している。この方法の開発により、遠心ポンプヘッドとモーターを分離させることができ、ポンプヘッドの滅菌が容易となり、臨床応用が可能になった（図1-5）。

図1-5 直線流路型遠心ポンプ構造図



3. 遠心ポンプの現在

3.1 遠心ポンプの利点と欠点

遠心ポンプは当初、補助循環や大動脈瘤手術時の循環維持手段等に使用されていたが、ここ数年、下記のようなさまざまな利点の認識が進み、我が国でも一般開心術や経皮的人工心肺システム（PCPS）に使用する施設が増加している。以下、一般的に利点、欠点と考えられている特徴を示す。

【利点】

1. 危険な高圧が発生しない。

遠心ポンプは、原理のところでも述べたように、遠心ポンプ出口以降での流れづらさにより、流量が変化する。出口以降で流れづらくなる場合、例えば、回路閉鎖などが、発生した場合でも、流量が減少するので、回路が破裂するような高圧は発生しない。予想外の回路狭窄や閉塞事故が生じても、回路や人工肺が、高圧で破損する危険性が少ない。

2. 空気の混入に対する安全性が高い。

遠心ポンプは、大量の空気が流入した場合、ポンプ作用が著しく低下するため、空気を送り込む危険性が小さい。

3. 過度な陰圧を生じない。

遠心ポンプでは、入口側が狭窄状態になると、流量が低下するため、過度な陰圧は生じない。

1、2は、遠心ポンプの原理に起因するフェールセーフ機構である。人工心肺操作中の医療事故として、人工心肺装置からの空気誤送血や、人工心肺回路や人工肺が、回路内圧が高圧になることによる破損することなどがあげられる。特に、人工心肺装置からの空気誤送血は、患者が、予後不良となる事があり、重大な医療事故となる。空気誤送血を防止するためのひとつの対策として、遠心ポンプの原理2に起因するに述べたように、遠心ポンプは、大量の空気が流入した場合、ポンプ作用が著しく低下するため、空気を送り込む危険性が小さい。という原理を、利用することがあげられる。

【欠点】

①負荷変動により流量が変化する。

遠心ポンプは、同じ回転数で運転しても圧力負荷（流れづらさ）が、変動すると流量が変化するため、流量を一定（人工心肺操作においては、必要流量を、一定に保つことが必要）に保つためには、常に流量計を監視し、回転数を適宜操作する必要がある。

②流量計が必要。

上記のように、遠心ポンプでは回転数と流量が1対1に対応しないため、流量を知るためには流量計が必要である。

③ベント、吸引ポンプとして使用できない。

空気を送ることができないため、ベント、吸引ポンプとしては使用できない。

④逆流（出口から入口に向かって）の危険。

日本体外循環技術医学会教育委員会・安全対策委員会が、2010年度に行った、心臓血管外科基幹・関連施設の446施設にたいするアンケート（回答数296施設）において、遠心ポンプで逆流を起こした施設が、16施設（5.4%）ある⁸⁾。これは、遠心ポンプの原理により、遠心ポンプの回転が停止、もしくは、回転数が不足していることにより、遠心ポンプ内の圧力が、出口以降の圧力より低くなると、逆流が起きる。臨床においては、患者の動脈圧が、遠心ポンプ内の圧力より高いと、逆流が生じるため、鉗子等でクランプする必要がある⁷⁾。

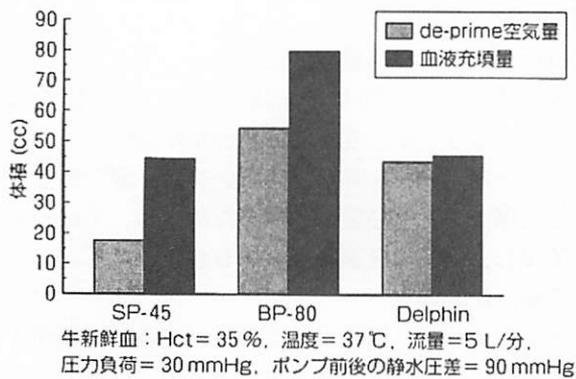
3. 遠心ポンプと空気の混入

遠心ポンプ内に空気が流入すると、比重の軽い空気では、大きな遠心力が発生しないため、回転したままでも、ポンプ機能は混入した空気の量に応じて低下する。しかし、ポンプ機能が完全に停止するためには、ある程度の空気が一度に流入する必要がある。この空気量以下の空気が、ポンプ内に流入した場合、流量は0にならないため、流入した空気はポンプ内でより小さな気泡に碎かれ、数分でほとんどの気泡が下流に送

られる。下流に送られた空気は、人工心肺回路内に空気を、取り除く部材を設置しておかないと、患者に空気を送り込んでしまう。遠心ポンプ内に空気が流入しポンプ機能が停止する現象は de-prime とよばれており、de-prime に要する空気の量が、小さいほど空気を送りにくいポンプであると考えられている。

de-prime 空気量はポンプヘッド内の血液充填量が少ないほど小さい傾向がある(図1-6)。なお、空気流入前の送血量が低いと、いずれのポンプでも de-prime 空気量は減少する⁷⁾。

図1-6 遠心ポンプの de-prime 空気量のポンプヘッド内の血液充填量



5. 流量計

遠心ポンプに使用するには、流量計が必要である。流量計には電磁式と超音波ドプラー式の2種がある。それぞれ利点と欠点があるため、特徴をよく理解することが必要である。

1) 電磁式

導電性の流体が流れる管路に、垂直な磁界をかけると、磁界と流れの方向に垂直方向に起電力が生じる、という原理を利用している。磁界を発生させるための着脱式コイル部と、起電力を取り出すための電極が埋め込まれたディスコネクタが必要となる。

【利点】

- ①比較的高精度(±5%程度)である。
- ②プライミング液でも流量計測が可能のため、血液を流す前に動作を確認することができる。

【欠点】

- ①使用前に必ず零点調整作業を行う必要がある。
- ②電極が血液接触面に露出しているため、アースの接続などに細心の注意を払う必要がある。人工心肺回路では、熱交換器を通じて温水循環装置とも電気的につながっているため、零点調整を行う前に温水循環装置も動作させておかないと思われぬ誤差が生じることがある。
- ③電気メスなどの電磁ノイズの影響を受けやすい。
- ④高濃度代用血漿により動作不良となることがある。

2) 超音波ドプラー式

管壁から超音波を送信し、血流速に対応する、血球からの反射波のドプラーシフトを計測するものである。回路チューブに直接送受信センサーを装着するものと、専用のディスコネクタにセンサーを装着するものがある。

【利点】

- ①血液と装置の間に電気的な接続がなく、電磁ノイズの影響も受けにくい。
- ②電磁式のような零点調整作業が不要で、センサーを装着すればすぐに使用できる。

【欠点】

- ①精度は電磁式に劣る(±10%程度)。
- ②血液粘度、センサーを装着部上流の管路の曲がり等の流速分布を変化させる要因が精度を低下させることがある。
- ③プライミング液では、超音波を反射する有形成分がないため使用できない。
- ④センサーと管壁の間に異物が入ったり、隙間があると大きな誤差が生じる⁷⁾。

引用文献

- 1) Hall JE, James PA, Lucas BGB, et al: Some observations on industrial pumps for extracorporeal circulation in man. Thorax 13:34, 1958
- 2) Saxson GA, Andrews CB: An ideal heart pump with hydrodynamic characteristics analogous to the mammalian heart. Trans ASAIO 6: 288, 1960
- 3) Golding DG: Initial clinical experience with a new temporary left ventricular assist device. Ann Thorac Surg 29: 66, 1980
- 4) 日本体外循環技術医学会教育委員会・安全対策委員会: 人工心肺装置における安全装置などに関するアンケート: 2010
- 5) Rafferty EH, Kletschka HD: Artificial heart, application of nonpulsatile force-vortex principle. Minn Med 51:11, 13468.
- 6) Kletschka HD, Rafferty EH: Artificial heart: III Development of efficient atraumatic blood pump. A review of the literature concerning in vitro testing blood pump for hemolysis. Minn Med 58: 756, 1975
- 7) 井野隆史, 安達秀雄: 最新体外循環. 第2版: 2003.
- 8) 日本体外循環技術医学会安全対策委員会: 体外循環に関するインシデント・アクシデントと安全対策アンケート: 2010