

## 心臓血管外科手術と人工心臓

### 1 人工心臓装置の開発

心臓血管外科手術で治療の対象となる心臓は、全身に血液を送るために片時も休むことなく動き続け、大血管は心臓から駆出された血液を継続的に全身の各臓器に送るための重要な導管となっている。心臓血管外科手術は、この絶え間なく働き続ける臓器の修復を行うための手術であり、その治療のために一時的に中断しなければならない機能を代行し、全身循環を維持することを可能にする人工心臓装置は、心臓血管外科手術にはなくてはならない装置である。

体外循環という考え方が世界で初めて論文で公表されたのは、今から200年も前のことであった。フランスの Julian-Jean-Cesar LeGallois<sup>1)</sup> が、首を切断したウサギの動脈から持続的に動脈血を注入することで、ウサギを生存させるという試みを1812年に論文として発表した。この実験は不成功に終わったが、この論文をきっかけとしてその後臓器灌流の研究が多数行われるようになった。150年ほど前の1869年には Ludwig および Schmidt<sup>2)</sup> が血液と空気を大きな球の中に入れて振り、動脈血化することに成功しており、これが酸素加の研究のはじまりであった。今から150年も前に今日の人工肺の概念が考えられていたということに驚きを隠せない。

20世紀になって体外循環・臓器灌流の研究が活発になり、ノーベル医学賞を受賞した Alexis Carrel が主宰するロックフェラー研究所で研究助手をしていた Charles A Lindbergh（飛行機で大西洋横断をなしとげたことで一躍有名になったが）が、1935年に公表した論文<sup>3)</sup>の中で、いかなる臓器も体外循環装置の開発によって、体外での生存維持を可能にするであろうと予言

している。Carrel・Lindberghらの時代におけるこの予言はまことに大胆であるが、この時代の研究者たちがいかに熱意をもって体外循環の開発に臨んでいたかが窺える。

ほぼ同じ年代の1937年、Gibbon<sup>4)</sup>は酸素加装置を開発し、ネコを用いて体外循環の実験をした。その実験の中で肺動脈を遮断しても人工心臓で、短時間の生存が可能であったことを報告した。Gibbon<sup>5)</sup>は動物での基礎実験を繰り返したのちの1953年に、人工心臓を用いて18歳女子の心房中隔欠損症の根治手術に世界で初めて成功した。ここで用いられたポンプはDeBakey<sup>6)</sup>が1934年に開発したローラーポンプであり、今日ひろく用いられているポンプの原型とされている。

今から60年前に史上初めて人工心臓を用いた手術に成功したことは華々しく聞こえるようでもあるが、Gibbonがその前後に手術施行した他の5名の患者は不幸な転機をたどっており、一時的に人工心臓を用いた心臓手術は中止されることとなった。

その後、多くの研究者たちによってさまざまな試行錯誤がくりかえされ、今日の安全な人工心臓装置が確立されるまでは、その都度改良・開発が進められてきた。今ある人工心臓装置があるのも、多くの研究者たちの弛まぬ努力と、多くの患者さんたちの命の犠牲があったことを忘れてはならない。

## 2 人工心臓に関わるさまざまな開発と心臓血管外科手術への応用

心臓血管外科の手術の進歩は、いわば人工心臓の進歩であるといっても過言ではないであろう。以下に述べる技術革新を人工心臓装置と組み合わせることで、心臓血管外科手術の成績向上に大きく貢献した。

### a) 血液ポンプの開発

現在の心臓手術に用いられているポンプは、前述の1930年代にDeBakey<sup>6)</sup>が開発に携わったローラーポンプが代表的である。1980年代から血液損傷が少ないと定評のある遠心ポンプも心臓手術に用いられるようになってきた。

## b) 人工肺の開発

Gibbon が世界初の成功例として報告した際の手術で使用した人工肺はフィルム型であった。その後の開発により低コストなディスポーザブル気泡肺が出現し、広く心臓手術で用いられた。1955年にKolffら<sup>7)</sup>によって開発された膜型肺は、血球成分への影響が少なく、より生体適合性の高い人工肺として使用が始まったが、その後の開発が進み、ポリプロピレン膜の中空糸型構造を取り入れることで、酸素加効率が格段に向上し、コストも抑えることに成功したため、現在はこの膜型肺が心臓血管外科手術における人工肺の主流となっている。

## c) 低体温手術

人工心臓を用いない低体温法による心臓手術は、1952年Lewisら<sup>8)</sup>によって報告された。表面冷却で全身を中等度冷却し、心臓への流入血を遮断して心内手術を行う方法であり、人工心臓を用いたGibbonの報告よりも1年前に心房中隔欠損症の手術に成功しているが、さまざまな制約がありお世辞にも安全な手術とは言えなかった。その後の研究成果から、低体温法は臓器保護の面での大きな利点があることが認められるようになった。人工心臓と組み合わせる超低体温±循環停止法は、複雑心奇形の手術や胸部・胸腹部大動脈瘤の手術の際に応用されることによって、再建術式の際の時間的猶予をもたらし、手術成績が飛躍的に大きく向上した。

## d) 心筋保護

1955年にMelrose<sup>9)</sup>は、高濃度カリウム(245 mEq/L)を用いた心停止液を開発し、1957年にDonald Efflerら<sup>10)</sup>により臨床応用されたが、高度の心筋障害となり、患者は死亡した。後に心機能障害の原因は高濃度カリウムによるものと考えられた。この時、Melroseは『自在に心臓を停止、再拍動させることができ、大きな障害も残らないとすれば、どれほど大きな貢献になるだろうか。』と考え、更なる研究を重ねた。1973年には約1/10のカリウム濃度の溶液を用いて心臓手術に成功し、その後は心筋保護液が心臓手術に定

着するようになった。Melrose の追求した理想的な心筋保護液を用いた手術が可能になることで、心内修復の時間的猶予がもたらされ、手術成績が飛躍的に向上した。

### e) 分離体外循環

胸部大動脈瘤の人工血管置換手術を行う際には、大動脈を一時的に切り離す操作が必要となり、短時間であれば低体温循環停止法が有用であるが、ある程度の時間的猶予を得るためには脳循環を維持するための分離体外循環を使用する方法が有効となる。胸腹部大動脈瘤の置換手術を行う際には、肝・腎・腸管への血流を維持するためにも分離体外循環が有効であり、これらの手技が確立したことによって臓器障害が軽減し手術成績は格段に向上した。

人工心肺装置は心臓血管手術の際に、心臓・大血管・肺の機能を見事に代用し、疾患に対する修復するための時間的猶予をもたらし、以前は不可能であったであろう複雑な手術を安全に行うことを可能にしてきた。すべては心臓血管外科手術を安全に行うため、患者さんの命を救い、臓器を守るための、先達たちの探求心と努力の賜物である。

## 3 人工心肺の安全管理

人工心肺装置は、心臓・大血管・肺の機能を代行するきわめて有用で魅力的な装置である。しかしながら、人工心肺が使用されている状況下では、本来の心臓・大血管・呼吸の機能が停止しているため、人工心肺装置のトラブルは循環・呼吸機能の破綻を意味し、そのトラブルが解決されなければ数分以内に患者さんは死に至ることとなる。他の医療機器と異なり、一時的に装置を止めて復旧する処置を行うなどという時間的な猶予はきわめて短い。

人工心肺装置の安全管理を怠った場合には、取り返しのつかない不幸な転機に陥り、業務上過失致死傷罪という刑事罰が問われる可能性もある<sup>11)</sup>。人工心肺装置の脱血路に陰圧がかかりすぎて回路内に空気を吸い込み、そのまま患者側に空気を送り高度脳障害から死に至った症例、心筋保護液に十分な量のカリウムを投与せず使用し、心筋障害が生じたため死に至った症例、

これらに代表されるような比較的見落としがちな操作ミス、いわゆるヒューマンエラーによる事故が死に直結するのも人工心臓装置の有する大きな特徴でもある。

人工心臓装置を操作するうえで機器に関する知識が必要であることは言うまでもないが、些細な非日常が重大な事故につながりかねないことを常に念頭に置き、トラブル発生の際にはトラブルシューティングについての知識も必要とされる。人工心臓装置を担当する臨床工学技士の業務は、「診療の補助として生命維持管理装置（人工心臓装置など）の操作を行うこと」であるが、「医師の具体的指示を受けなければ、生命維持管理装置の操作を行ってはならない」（臨床工学技士法 第2条）と規定されている。しかしながら、手術中に人工心臓操作に大きなトラブルが発生した場合には、人工心臓を装着した非生理的な環境下で今何が起きているのかを、執刀医・麻酔科医を含めた手術室スタッフへの確に伝達し、直ちにどのような対処をすればよいか、意見を発することも時には必要とされる。安全を確保し患者さんの命を守るために、執刀医に手術の手を止めるように進言し、トラブル解決に協力を要請することが必要な場面もあるかもしれない。

人工心臓を操作する臨床工学技士は、人工心臓の基本的知識を固め、常日頃から装置の保守点検を行い、命を懸けて臨んでくる患者さんの病態生理を理解し、心臓大血管手術が安全に遂行されるよう、万全な準備を整える必要がある。本書がその準備を整える時に、技士の皆様の手元におくべき最善のハンドブックになることを期待している。

## ■文献

- 1) LeGallois JJC. Experiences sur le principe de la vie. Paris: D'-Hautel; 1812. Cited by Hewitt RL and Creech O.
- 2) Ludwig C, Schmidt A. Das Veralten der Gase, Welche mit dem Blut durch die reizbaren Saugthieremuskelz stromen. Arb Physiol Annst Leipzig. 1869; 3: 1. Cited by Hewitt RL and Creech O.
- 3) Carrel A, Lindbergh CA. The culture of whole organs. Science. 1935; 81: 621.