

人工肺ガスフラッシュに関する検討

東條圭一¹⁾・藤井正実¹⁾・木下春奈¹⁾・田村美沙紀¹⁾
大島弘之¹⁾・武田章数¹⁾・古平 聡¹⁾・宮地 鑑²⁾

要 旨

長期間の経皮的心肺補助 (percutaneous cardio pulmonary support : PCPS) では、人工肺中空糸内に貯留した水が人工肺のガス交換有効膜面積を減少させガス交換能低下を来す (ウエットラング状態)。このような場合、人工肺の吹送ガスを一時的に増加させ中空糸内の水を飛ばして (ガスフラッシュ) ガス交換能を改善させることがある。今回我々は、均質膜構造を持つ人工肺テルモ社製 CAPIOX-LX、ニプロ社製 BIOCUBE、多孔質膜にシリコンコーティングした泉工医科業社製 EXCELUNG PRIME について実験用回路を作製してウエットラングを改善する方法について実験を行った。その結果、ウエットラング状態でのガス交換能の低下は BIOCUBE、エクセラン、CAPIOX の順で大きかった。ガスフラッシュによる有効膜面積は、EXCELUNG PRIME 25L/min、CAPIOX 10L/min、BIOCUBE 30L/min 以上の吹送ガス流量にて改善できることが分かった。また、ガスフラッシュの時間は3種とも5秒で効果が得られた。PCPSにおいて人工肺を長時間連続して使用する場合、結露によるウエットラングを防ぐことは困難であるが、ガス交換能回復が見込めることが示唆された。

索引用語 : 人工肺、ウエットラング、PCPS (ECMO)、有効膜面積、ガスフラッシュ

Experimental examination of the oxygenator gas flash

Keiichi Tojo¹⁾, Masami Fujii¹⁾, Haruna Kinoshita¹⁾, Misaki Tamura¹⁾, Hiroyuki Oshima¹⁾, Akikazu Takeda¹⁾, Satoshi Kohira¹⁾, Kagami Miyaji²⁾

Abstract : In PCPS over a long period of time, the water stored in the oxygenator hollow fiber decreases the gas exchange effective membrane area of an oxygenator and causes a gas exchange ability drop (wet lung state). In such a case, we increase to supply with gas of the oxygenator temporarily (gas flash), and improve gas exchange ability. We experimented reduction of wet lung state creating the circuit for an experiment about three kinds oxygenator, silicon coated MERA EXCELUNG PRIME, made with homogeneous membrane structure TERUMO CAPIOX-LX, and NIPRO BIOCUBE. As a result, the drop of the gas exchange ability in the wet lung state was severe in order of BIOCUBE, EXCELUNG, CAPIOX. It was revealed that the effective membrane area could be improved by gas flow quantity more than 25L/min in EXCELUNG, 10L/min in CAPIOX, 30L/min in BIOCUBE. Moreover, improvement of the effective membrane area in all oxygenator was obtained by making gas flow 5 seconds. When using the oxygenator continuously in PCPS for a long time, the results suggested that the gas exchange ability could be improved by effective gas flash.

Key words : oxygenator, wet lung state, PCPS (ECMO), effective membrane area, gas flash

1) 北里大学病院 ME 部

東條圭一 (Keiichi Tojo)

〒 252-0375 神奈川県相模原市南区北里 1-15-1

Department of Medical Engineering, Kitasato University
Hospital

1-15-1 Kitasato, Minami-ku, Sagami-hara, Kanagawa 252-0375, Japan

2) 北里大学 医学部 心臓血管外科学

I. 緒 言

長期間に及ぶ経皮的心肺補助 (percutaneous cardio pulmonary support : PCPS) の管理では、人工肺中空糸内に貯留した水が人工肺のガス交換有効膜面積を減少させガス交換能低下を来すことがある¹⁾。この状態を通称人工肺の「ウエットラング」状態と呼び²⁾、この状態は、血液層からガス層へ出てきた水蒸気の結露により発生する³⁾。ウエットラングは、人工肺の吹送ガス加温などによって対策することが可能であるが、

表1 対象

	膜面積 (m ²)	膜の材質	充填量 (mL)	最大血流量 (L/min)	最大ガス流量 (L/min)
EXCELUNG PRIME	2.3	ポリプロピレン+シリコンコーティング	225	7	15
BIOCUBE	1.3	特殊ポリオレフィン	250	5 (補助循環時)	VQ 比 = 5
CAPIOX-LX	2.5	ポリメチルペンテン	250	7	20

結露を完全に防ぐことができず、吹送ガスを一時的に増加させ中空糸内の水を飛ばしてガス交換能を改善させるガスフラッシュを行うことがある⁴⁾。

ガスフラッシュは、中空糸内外の圧力差によりガス層から血液層へ空気が混入する危険性があり⁵⁾、更にVQ比の増加により送血の二酸化炭素分圧を著しく低下させるなどの危険性もある⁶⁾。これまでは、それぞれの経験値などから施設ごとにガスフラッシュを行っているのが現状であり⁷⁾、ウエットラングとその改善方法に関する検討報告はあるが、ガスフラッシュの方法についての具体的な方法論に関する報告はない。

更にウエットラングの影響として、開心術中の人工心肺中やカタログスペックでは人工肺吹送ガス設定に差を見ないメーカーの異なる人工肺においても、PCPS施行時に灌流開始数時間を経過すると、同様の灌流条件を維持するための人工肺吹送ガス設定が大きく異なることがある。

そこで今回我々は、PCPSで使用される人工肺でのウエットラング状態におけるガス交換能低下と、ガスフラッシュによるガス交換能回復の方法についてin vitroにて実験を行い、最適なガスフラッシュの方法について検討したので報告する。なお、本研究における開示すべきCOIはない。

II. 研究方法

1. 対象

ガスフラッシュ検討の対象とした人工肺は、PCPSや体外式膜型人工肺 (extracorporeal membrane oxygenation : ECMO) において本邦で広く用いられている人工肺のうち、長期耐久性を有し血漿漏出を防止することができるガス交換膜であるポリメチルペンテン製非対称膜を持つテルモ社製CAPIOX-LX^{®8)}、ニプロ社製BIOCUBE^{®9)}、ポリプロピレン製多孔質膜にシリコンコーティングした泉工医科工業社製EXCELUNG PRIME^{®10, 11)}の3種とした(表1)。今回対象とした人工肺は、基本的にシリコン膜などの均質膜と同等の耐血漿リーク性があるため¹⁰⁾、中空糸のガス層が結露した場合でも、ガスフラッシュによる中空糸内の結露除去により、効果的に中空糸のガス交換能回復を図ることが可能である。

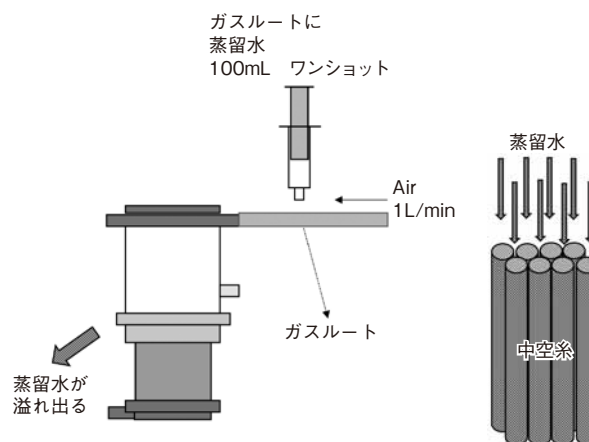


図1 ウエットラングモデルの作製

2. ウエットラングモデル

本研究に際して、人工肺の中空糸内に水分が貯留したウエットラング状態を模擬するために、実験用のウエットラングモデルを作製した。ウエットラングモデルは、中空糸を十分に乾燥させた状態の人工肺 (dry) の中空糸ガス層内に人為的に蒸留水を注入して、擬似的結露状態とすることによってガス交換有効膜面積が減少した状態の人工肺 (wet) を作製し、ガス交換能低下状態となるようにした。蒸留水は人工肺内の中空糸全体に蒸留水が行き渡るように、吹送ガスを1L/minで流した状態でガスルートよりシリンジにてワンシヨットした。蒸留水の注入量は、中空糸入口全体に蒸留水が充填され、かつ人工肺吹送ガス排出ポートから余剰分が排出される量となるように、3種の人工肺とも100mLで行った(図1)。

3. 測定用モック回路

人工肺のガス交換能を評価するために、図2に示すモック回路を作製した。モック回路は、人工心肺用貯血層出口ポートに遠心ポンプを設置し、ポンプにて灌流液を循環する回路とした。灌流液には蒸留水、流路には3/8インチタイゴンチューブを使用した。遠心ポンプ出口に、任意のPO₂、PCO₂値にできるようにガス交換膜を設置し、空気と二酸化炭素の混合ガスを吹送した。また、実験中の灌流液温度を一定に保つために、泉工医科工業社製心筋保護用熱交換器をガス交換膜に接続して温度調整を行った。更に、人工肺に流れる灌流液流量の測定は、トランジットタイム式流量計を使

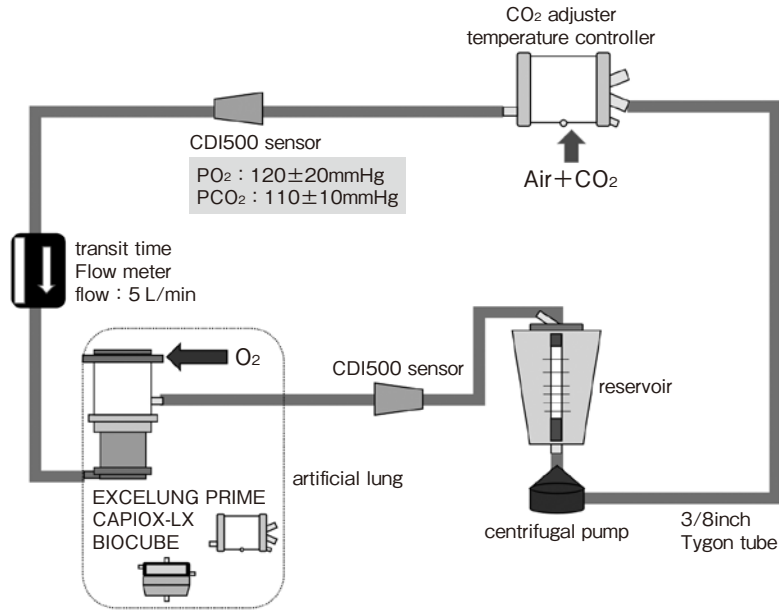


図2 測定用回路(モック回路)

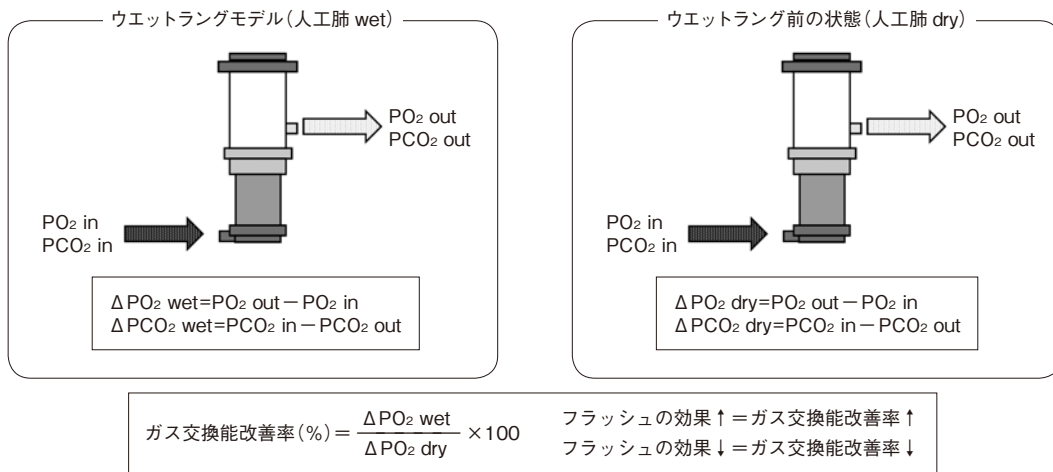


図3 有効膜面積の判定

用した。

人工肺に流入させる灌流液の PO₂ in、PCO₂ in を測定するために、テルモ社製体外循環用血液ガス分析装置 CDI500[®]を血液流入ポートに装着し、同様に人工肺から流出される灌流液の PO₂ out、PCO₂ out を測定するために、人工肺血液流出ポートに CDI500 を装着した。

測定条件は、灌流液流量を 5.00L/min ± 5%、灌流液温度 37.0 ± 0.5°C とした。人工肺ウエットラングモデルへ灌流液のガス分圧をそれぞれ PO₂ in 120 ± 20mmHg、PCO₂ in 110 ± 10mmHg とするように、ガス分圧調節人工肺吹送ガスの流量を調節した。実験中のガス分圧の測定は、すべて pH-stat にて行った。

4. 方法

1) ウエットラングモデルのガス交換能の測定実験
ウエットラングモデルのガス交換能を検討するため

に、まず十分に乾燥させた検討対象人工肺 (dry) を使用して人工肺本来のガス交換能を計測し、人工肺 (wet) の比較対象とした。ガス交換能は、吹送ガスを流量 0 ~ 30L/min で変化させて人工肺入口と出口の酸素分圧の差 (ΔPO₂) および二酸化炭素分圧の差 (ΔPCO₂) を算出して評価した。次に、ウエットラングモデルに対して同様の測定を行い、人工肺 (dry) と人工肺 (wet) のガス交換能を比較検討した。なお、本算出式では ΔPO₂ dry = ΔPO₂ wet のときガス交換能改善率 100% となる (図 3)。

2) ガス交換能改善率の算出

ウエットラング状態の人工肺のガス交換能は、水分による中空糸の閉塞によりガス交換有効膜面積が低下し、使用開始直後の dry 状態より低下する¹²⁾。人工肺 (dry) と人工肺 (wet) のガス交換能のグラフから、図 3 に示すガス交換能改善率を算出し、吹送ガス流量と

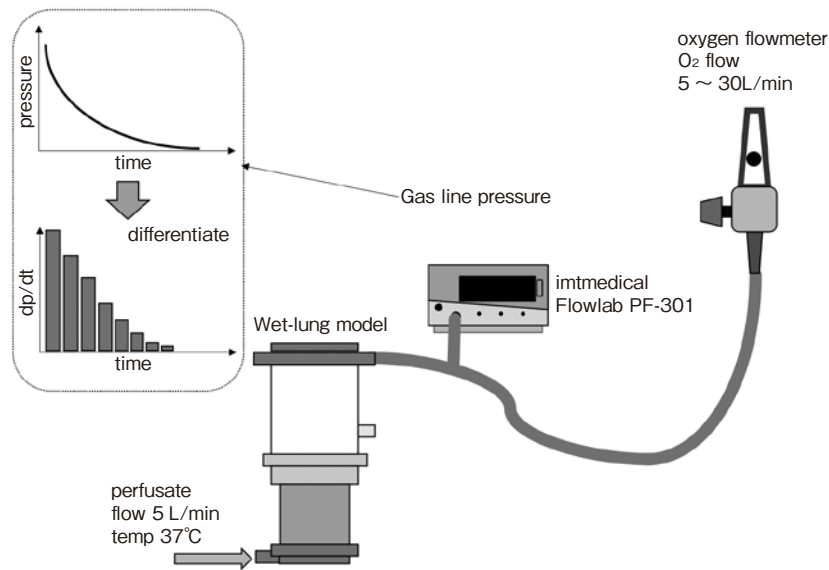


図4 測定回路(ガスルート内圧)

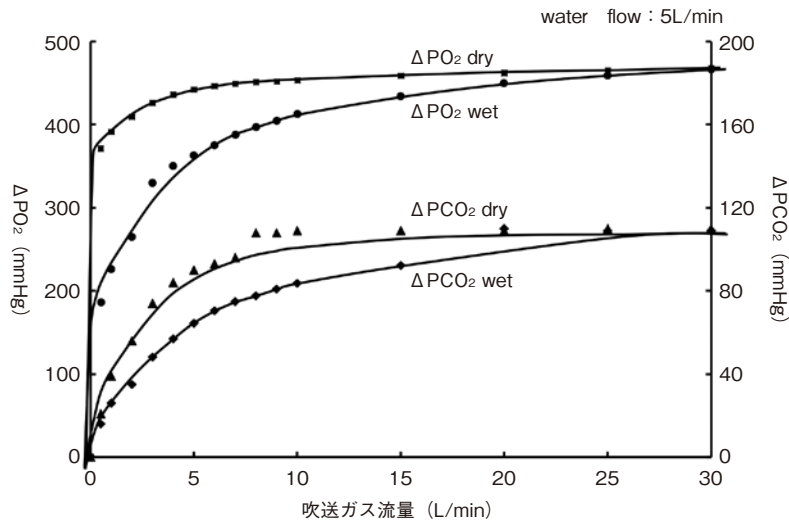


図5 EXCELUNG PRIME のガス交換能

ガス交換能改善率の関係を評価した。なお、ガス交換の検討は PO_2 、 PCO_2 双方で検討したが^{13, 14)}、 PCO_2 は水溶液中で炭酸となるため含有量での測定が困難であるため参考値とし¹⁴⁾、基本的な検討は PO_2 で行うこととした。

3) ガスルート内圧の測定実験

人工肺 (wet) をモック回路内に装着し、検討対象人工肺のガスルート内圧を測定するために、imtmedical 社製 Flowlab PF-301 を装着した。酸素流量計にて酸素流量を調節し、3分間連続吹送した。ガスルート内圧のサンプリングを1回/secとして測定し、圧-時間のグラフを作成した。このグラフ上、ガスルート内圧曲線の変化が大きいかほど水滴を飛ばしている状態であり、ガスフラッシュが有効である⁸⁾と判断し、反対

に、変化が小さいほど水滴を飛ばしていない状態であり、ガスフラッシュが無効であると判断した⁹⁾。そこで、実験から得られた圧-時間のグラフより、ガスルート内圧の変化量を抽出するために1秒ごとの微分値を棒グラフで作成し、フラッシュが開始直後から有効作用時間について検討した(図4)。

III. 結 果

1. ウェットラングモデルのガス交換能

3種の人工肺について、人工肺 (dry) と人工肺 (wet) の測定を行い、横軸を吹送ガス流量、縦軸をそれぞれの ΔPO_2 、 ΔPCO_2 としてグラフ化し検討した。

1) EXCELUNG PRIME

図5にEXCELUNG PRIMEにおける人工肺 (dry)

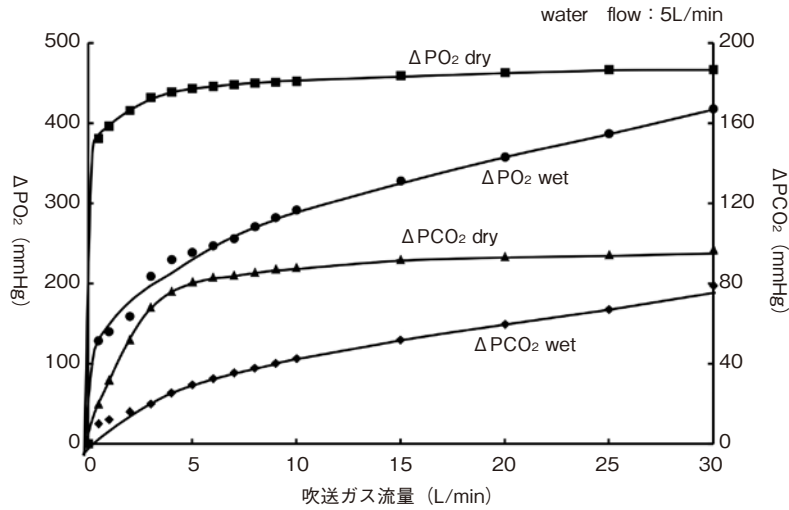


図6 BIOCUBE のガス交換能

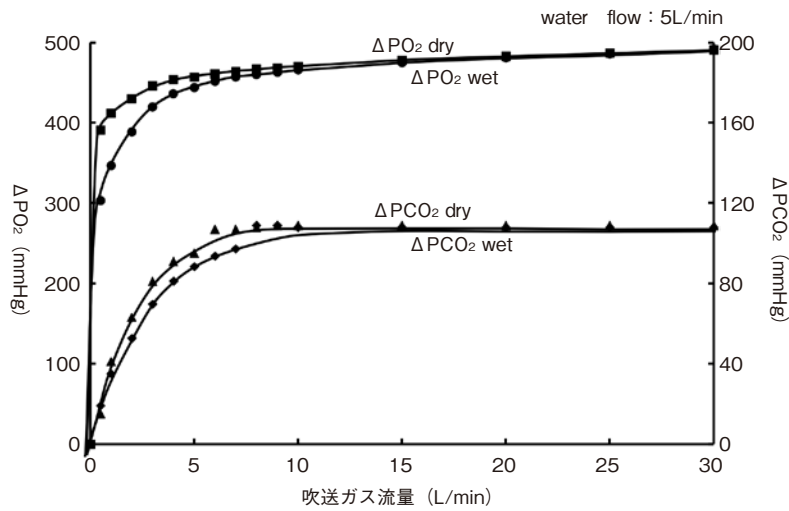


図7 CAPIOX-LX のガス交換能

と人工肺 (wet) のガス交換能と吹送ガス流量の関係を示す。人工肺 (wet) では、人工肺 (dry) に比してガス交換能は低下し、吹送ガス流量の増減によるガス交換能の変化の割合が大きくなった。EXCELUNG PRIME においては吹送ガス流量 0 ~ 20L/min で dry と wet においてガス交換能の差が生じた。特に 5 L/min 以下では、人工肺 (wet) の酸素加能低下が大きくなっており、臨床においてウェットラング発生時に PaO₂ が大きく低下する可能性が示唆された。

2) BIOCUBE

図6に BIOCUBE における人工肺 (dry) と人工肺 (wet) のガス交換能と吹送ガス流量の関係を示す。BIOCUBE も EXCELUNG PRIME と同様に、人工肺 (wet) では人工肺 (dry) に比してガス交換能は低下した。また、BIOCUBE では、30L/min までの吹送ガス流量では、人工肺 (dry) と人工肺 (wet) のガス交換能が等

しくなることはなかった。更に、dry と wet の差が大きく、ウェットラング状態でのガス交換能低下が EXCELUNG PRIME に比して大きいことが示唆された。しかし、臨床で通常使用される吹送ガス流量域である 1 ~ 5 L/min の吹送ガス流量において、人工肺 (dry) よりも人工肺 (wet) の方が、吹送ガス流量の増減に対してガス交換能の変化が小さく、特に PCO₂ での変化は緩やかであった。

3) CAPIOX-LX

図7に CAPIOX-LX における人工肺 (dry) と人工肺 (wet) のガス交換能と吹送ガス流量の関係を示す。CAPIOX-LX は他の2つの人工肺に比して、人工肺 (wet) でのガス交換能の低下が小さく、吹送ガス流量とガス交換能の特性もほぼ同様の変化を示していた。このことから、CAPIOX-LX はウェットラング状態でのガス交換能低下が起きにくい人工肺であることが示唆された。

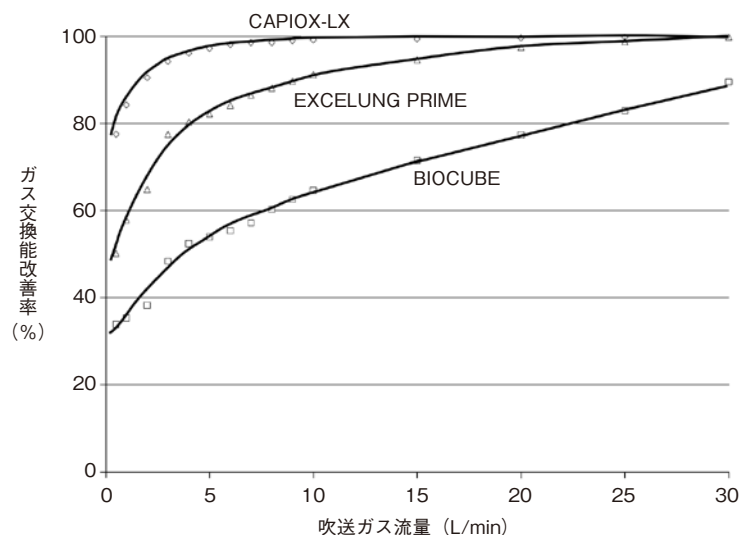


図8 各人工肺の酸素加能改善率

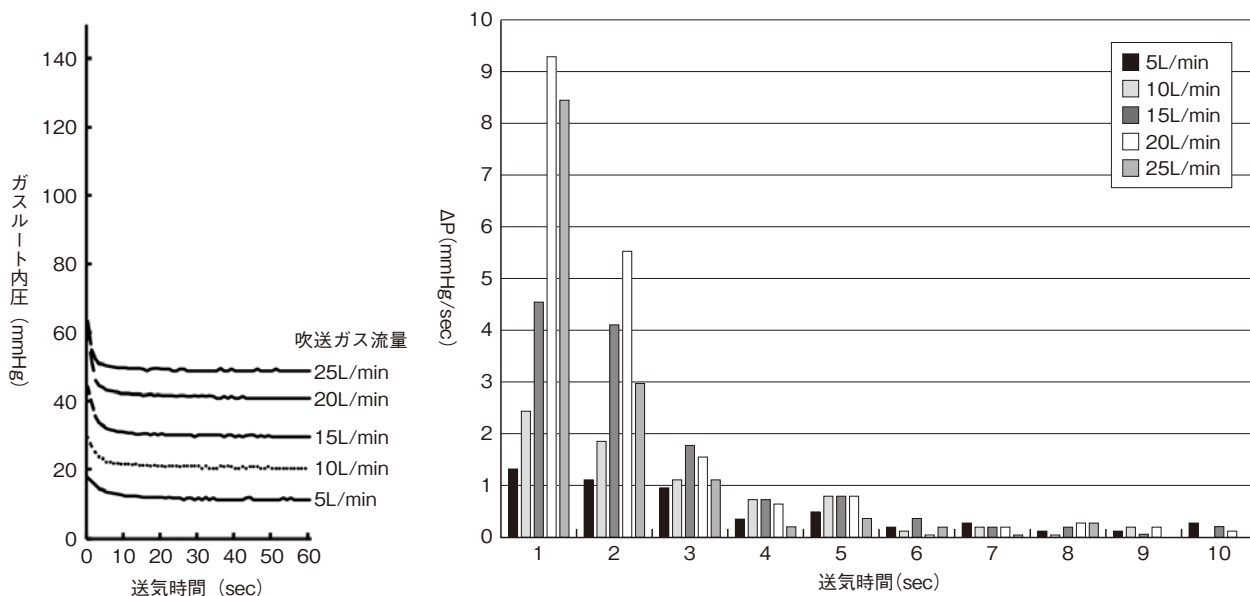


図9 ガスルート内圧の変化 (EXCELUNG PRIME)

4) 人工肺 3種の比較

図8に、各人工肺における図3に示した算出式で得られた酸素加能改善率と吹送ガス流量を示す。このグラフから、CAPIOX-LXは最も人工肺(wet)でのガス交換能の低下が少なく、ガス交換能改善率も吹送ガス流量10L/minで100%となった。反対に、BIOCUBEが最も人工肺(wet)でのガス交換能の低下の割合が大きく、吹送ガス流量30L/minでもガス交換能改善率90%程度になった。EXCELUNG PRIMEでは吹送ガス流量25L/minでガス交換能改善率100%となった。

2. ガスルート内圧の変化

3種の人工肺について、人工肺(wet)における吹送ガス流量とガスルート内圧の継時変化、吹送ガス

流量と1秒ごとのガスルート内圧の変化量をグラフ化して検討した。

1) EXCELUNG PRIME

図9にEXCELUNG PRIMEにおける人工肺(wet)への吹送ガス送気時間とガスルート内圧の変化および1秒ごとの変化量の関係を示す。ガスルート内圧はガスフラッシュ吹送ガス流量25L/minでピーク圧63.5mmHgとなった。また、変化量のグラフでは5秒以内ですべての流量で内圧の変化量が0mmHg/secとなり、それ以降は供給ガス配管圧の変化による流量誤差が原因とみられる変化のみとなった。

2) BIOCUBE

図10にBIOCUBEにおける人工肺(wet)への吹送

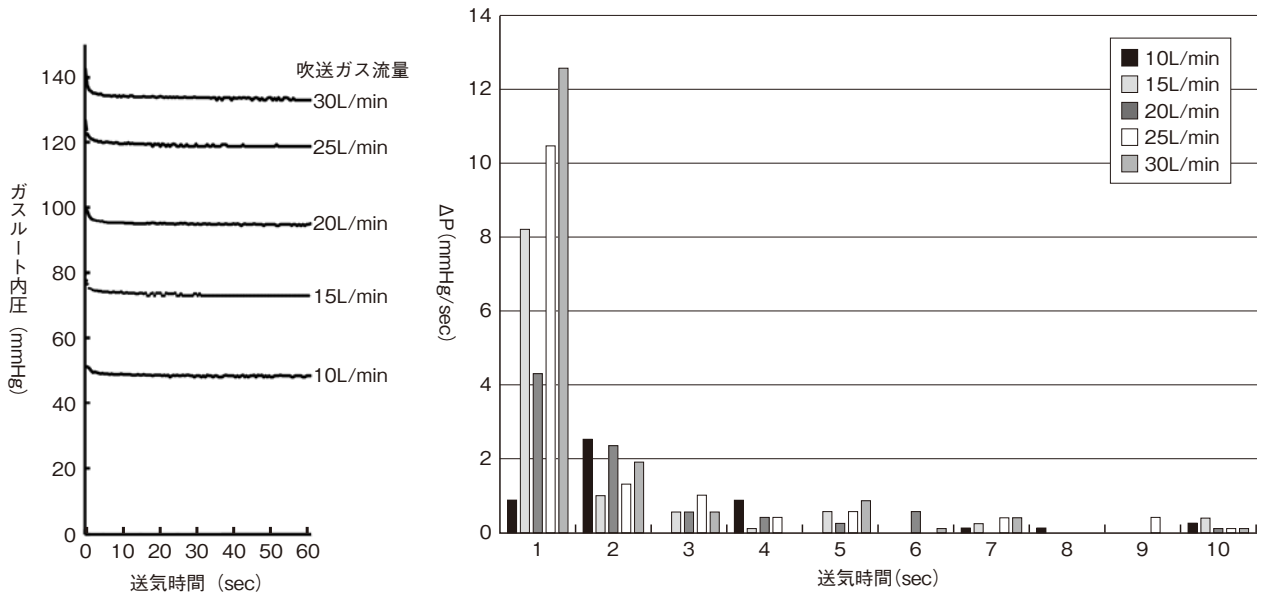


図 10 ガスルート内圧の変化 (BIOCUBE)

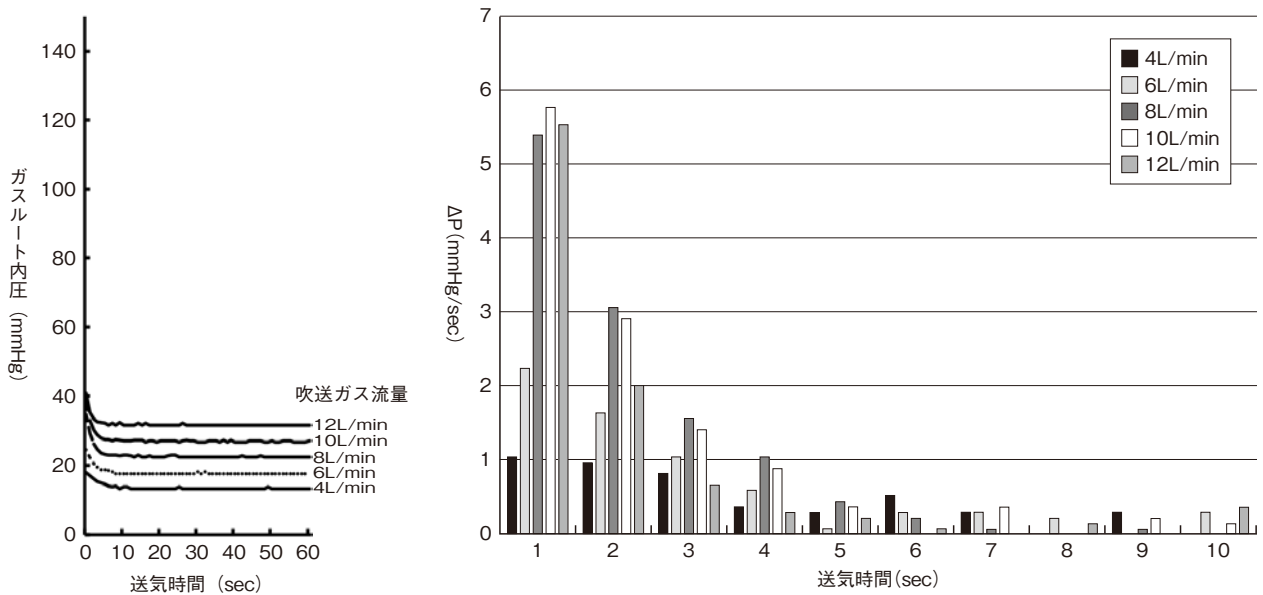


図 11 ガスルート内圧の変化 (CAPIOX-LX)

ガス送気時間とガスルート内圧の変化および1秒ごとの変化量の関係を示す。BIOCUBEでは、吹送ガス流量20L/minを超える流量ではガスルート内圧100mmHgを超えていた。変化量のグラフではEXCELUNG PRIME同様、5秒で内圧の変化量が0 mmHg/secとなり、それ以降は供給ガス配管圧の変化による流量誤差が原因とみられる変化のみとなった。

3) CAPIOX-LX

図 11 に CAPIOX-LX における人工肺 (wet) への吹送ガス送気時間とガスルート内圧の変化および1秒ごとの変化量の関係を示す。CAPIOX-LX でのピーク圧は10L/minで38.9mmHg、12L/minで41.0mmHgと

なった。また、CAPIOX-LXもEXCELUNG PRIMEと同様、5秒で内圧の変化量が0 mmHg/secとなり、それ以降は供給ガス配管圧の変化による流量誤差が原因とみられる変化のみとなった。

IV. 考 察

当院では、今回検討した3種の人工肺すべてをPCPS症例にて使用した経験を持つが、開心術の人工心肺中やカタログスペックではガス交換能に差を見ない3種の人工肺が、PCPSで使用した時に灌流開始後10時間程度経過した頃から、CAPIOX-LXではVQ比0.5~1.0程度で灌流条件を維持できるが、EXCELUNG PRIMEで

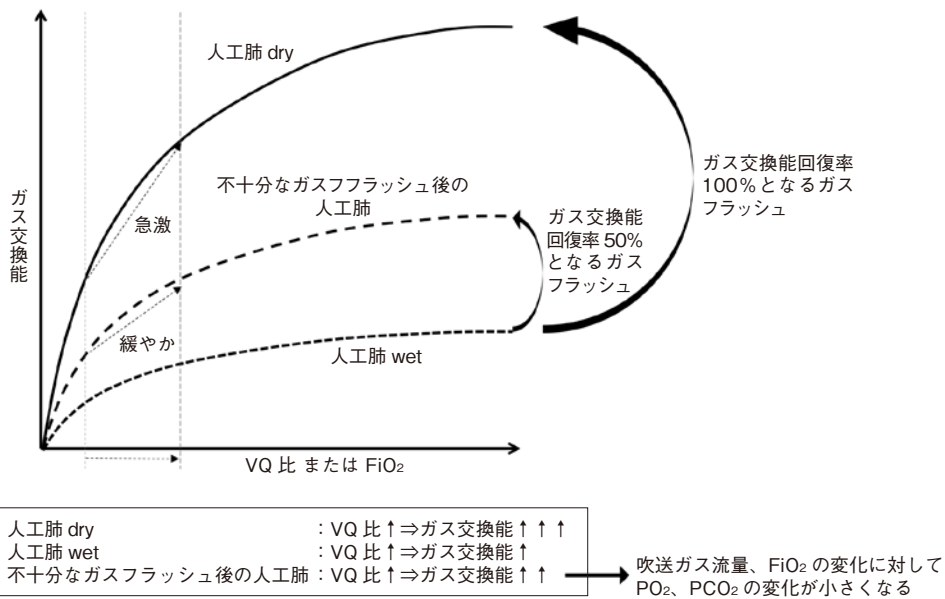


図 12 ガスフラッシュ後のガス交換能改善率が人工肺のガス交換能に与える影響

は VQ 比 1.5 ~ 2.0、BIOCUBE では VQ 比 1.5 ~ 3.0 程度必要とすることを経験していた。詳細は以下で述べるが、今回の実験ではウエットラング状態でのガス交換能低下率が人工肺の種類によって異なり、臨床での経験値と同様の結果となったことで、人工肺によって VQ 比が異なる理由がウエットラング状態での人工肺のガス交換特性の差であると証明できた。

また、3 種の異なる人工肺に対して検討した結果、構造によって有効的なガスフラッシュの条件は異なっていた。これは、同じ中空糸を使用した CAPIOX-LX と BIOCUBE においてガスフラッシュの条件は大きく異なっていることから、ガスフラッシュの効果は人工肺の膜面積や中空糸の編み方などが大きく影響していることが示唆された。

1. 推奨されるガスフラッシュの方法

1) EXCELUNG PRIME

EXCELUNG PRIME で推奨されるガスフラッシュの条件は、実験結果からガス交換能回復率 100%となる 25L/min 以上の吹送ガス流量が必要であると考えられる。しかし、添付文書に記載されている吹送ガス流量上限は 15L/min であるため、ガスフラッシュの条件は吹送ガス流量 15L/min とすべきである。なお、結果から得られた吹送ガス流量 15L/min の時のガス交換能改善率は 94.5%であったため、临床上、ガスフラッシュ後のガス交換能改善は十分であると考えられる。

フラッシュ時間は、実験結果から 5 秒で効果が得られるためガス調整の時間を考慮して、10 秒が適切であると考えられる。なお、添付文書での縛りはあるが、今回の検討結果から吹送ガス流量 25L/min でもガスルート内圧は 70mmHg 以下となるため、血液回路の回路内

圧が 70mmHg 以上の十分に高い条件であれば、25L/min でガスフラッシュを行っても血液層に空気を送る危険性は低いと考える。

2) BIOCUBE

今回の検討では、BIOCUBE において 30L/min を超えるガスフラッシュ流量が必要となり実際に臨床で行うには、ガスルート内圧が高くなり血液回路内圧を超えることによる血液層への空気の混入の危険性があり、ガスルート内圧や添付文書記載上の吹送ガス流量上限を適応すると、ガスフラッシュ流量不足になると考える。このため、BIOCUBE においては、ガスフラッシュを行ってもウエットラング状態の軽減に留まるため、VQ 比 = 5 を目標に可能な限りガス流量を上げて 10 秒程度のガスフラッシュを行うことで、ガス交換能の改善が図れると考える。血液流量 5 L/min の時の最大吹送可能ガス流量は 25L/min となるが、この時のガス交換能改善率は 82.9%程度となるので注意が必要である。したがって、BIOCUBE では、ガス交換能回復率がガスフラッシュによって十分に回復しないことが示唆された。

しかし、ガス交換能が 100%回復しない状態では、図 12 に示す通りガス交換能の曲線が緩やかになるため、VQ 比や FiO₂ の変更に対して、PaO₂、PaCO₂ の変化が緩やかになる可能性がある。結果的に BIOCUBE は意図的なウエットラング状態の維持により、ガスコントロールが容易になる可能性が示唆された。更に、ガスフラッシュ実施時の PaO₂、PaCO₂ の変化も小さくなるため、血液ガス分析データの変化による生体への影響も軽減できる。このため、BIOCUBE は人工肺のガスコントロールに不慣れた医療従事者でも、比較的使

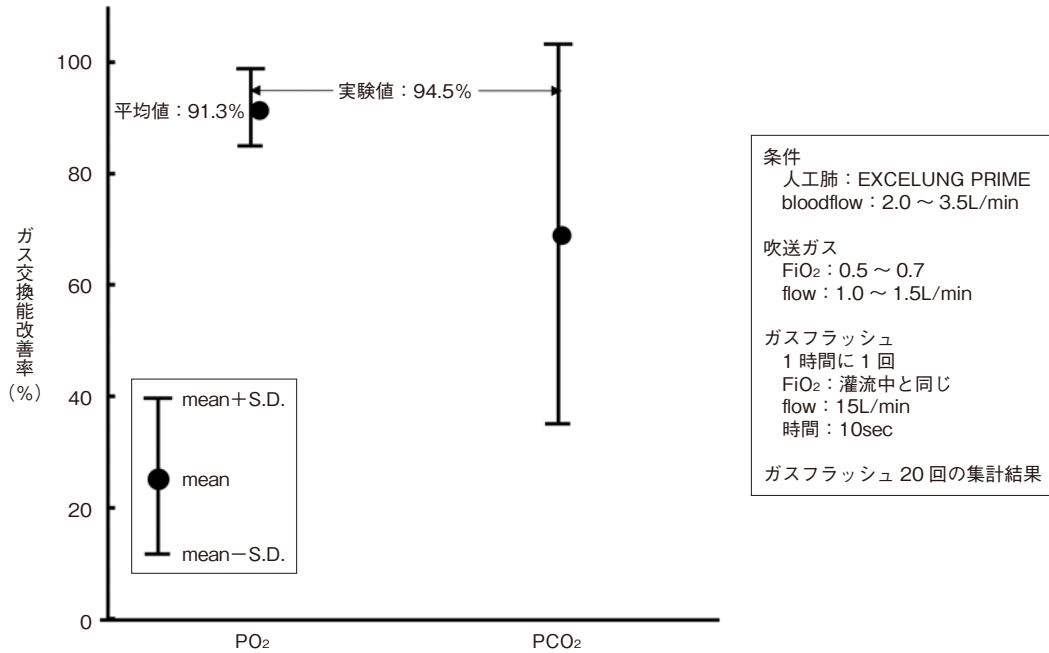


図 13 臨床での検証結果

しやすい人工肺であると考え。

3) CAPIOX-LX

CAPIOX-LX では、人工肺 (wet) と人工肺 (dry) のガス交換能の差が小さく、ウエットラング状態でのガス交換能の低下は 3 種中で最も小さい可能性が示唆された。そして、推奨されるガスフラッシュの条件は吹送ガス流量 10L/min、10 秒のガスフラッシュ時間で、十分にガスフラッシュが可能であり、3 種の中で最も容易にガス交換能の回復が図れる人工肺であると考え。更に、この条件ではガスルート内圧も十分に低いため、ガスフラッシュによる血液層へのガス混入の危険性も低いと考える。しかし、図 7 で示す通り 3 種の人工肺の中で、ウエットラング状態でのガス交換能の低下が小さく、かつ最もガス交換能曲線の傾きが大きいことから、常に低い VQ 比で人工肺のガスコントロールを行う必要があるため、吹送ガス流量や FiO₂ の変更により PaO₂、PaCO₂ を大きく変化させる可能性があり、ガスフラッシュによる生体への影響は大きく、かつ、人工肺のガスコントロールは繊細なものになる。このことから、CAPIOX-LX は高度なテクニックをもった専門家向けの長期型人工肺であると考え。

4) ガスフラッシュの実施間隔に関する考察

ガスフラッシュを実施する場合の重要な条件の一つに、ガスフラッシュの実施間隔がある。ガスフラッシュの間隔については、ガス交換能が低下する前に dry 状態を維持したほうが、人工肺のコントロール性は良いため、補助循環開始直後から、可能な限り短い時間間隔で実施することが、ウエットラング対策としては

効果的であると考え。

2. 臨床での検証

従来、当院では EXCELUNG PRIME に対してのガスフラッシュは、吹送ガス流量 5 L/min、ガスフラッシュ時間 3 分で実施していた。しかし、十分なガスフラッシュ効果を得ることができず、人工肺によるガス交換能低下により血液ガス分析データが不安定となる症例を経験していた。

EXCELUNG PRIME によって施行された PCPS 症例において、今回の検討で得られたガスフラッシュ条件にて 1 時間に 1 回のガスフラッシュを行い、20 回分のガスフラッシュ実施の前後でのガス交換能の変化を比較検討した (図 13)。その結果、今回の実験結果にて得られた酸素加改善率 94.5% に対して臨床での酸素加能改善率の実測値は 91.3 ± 7.2% (mean ± S.D.) と、実験結果と同等の結果が臨床使用の人工肺でも得られた。この結果から、今回の検討結果が臨床でも同等の結果を示すことが証明された。更に、本方法でのガスフラッシュ方法に変更後、すべての症例でウエットラングによるガス交換能低下を見ることはなくなった。

3. 考察のまとめ

以上の結果から、人工肺の種類によって最適な方法でガスフラッシュを行う必要はあるが、すべての人工肺でガスフラッシュによってウエットラング状態の改善を図ることができ、ガス交換能の回復を図ることができる。しかし、ウエットラング状態でのコントロールが患者の血液ガスコントロールを容易にする可能性もあるため、dry 状態でのガス交換能とウエ

ットラング状態でのガス交換能、ガスフラッシュによる改善後のガス交換能を把握することにより、更に高度な人工肺コントロールが可能になると考える。更に、今回検討した3種の人工肺はそれぞれガス交換能回復率とガスフラッシュの方法に利点欠点があるため、例えば、専門スタッフ以外のガスコントロールが必要な施設でのPCPS管理はBIOCUBE、高効率のガス交換能が必要な肺補助のECMO症例の場合にはCAPIOX-LXを選択するなど、人工肺の特性を十分に理解した上で、施設ごとのPCPS管理体制に合った人工肺を選択すると更なる高度な補助循環管理が可能になると考える。

V. 結 語

人工肺の種類によって、ウエットラングによるガス交換能低下とフラッシュによるガス交換能改善に差があることが示唆された。このため、ウエットラング改善のためのガスフラッシュは、人工肺によって異なった方法をとる必要があると考える。PCPSにおいて人工肺を長時間連続して使用する場合、結露によるウエットラングを防止することは困難であるが、効果的なガスフラッシュにより、ガス交換能回復が見込めることが示唆された。ガスフラッシュ実施には操作間違いなどのリスクがあるため、今後は、自動でガスフラッシュが行えるような装置の開発に期待したい。

●参考文献

- 1) 百瀬直樹:体外循環の危機管理. Cardiovascular Anesthesia, 15 (1); 55-60, 2011.
- 2) 岩田浩一, 阿部敬二郎, 宇都宮精治郎:PCPS人工肺のウエットラングの検討. 体外循環技術, 31 (4); 417-419, 2004.
- 3) 安野 誠, 戸田久美子, 花田琢磨, ほか:PCPSの新たな結露対策について. 体外循環技術, 37 (4); 436-439, 2010.
- 4) 倉島直樹, 竹田博行:PCPS施行時における自動酸素フラッシュ装置の試作. 体外循環技術, 27 (2); 13-15, 2000.
- 5) 中村淳史, 若松禎人, 鈴木廣美, ほか:人工肺用ガスフラッシュ装置の試作と安全性について. 体外循環技術, 34(2); 124-127, 2007.
- 6) 由良正幸, 城定 聡, 池田和之, ほか:人工心肺時, 酸素流量変化による血中炭酸ガス分圧調節. 日本手術医学雑誌, 11 (2); 278-280, 1990.
- 7) テルモ株式会社:経皮的心肺補助システム キャピオックス® EBS®心肺キット LXタイプ. 体外循環技術, 38 (1); 107-109, 2011.
- 8) 中前健二:経皮的な心肺補助装置(PCPS). ハートナーシング, 20 (11); 1075-1082, 2007.
- 9) 巽 英介:抗血栓性と長期耐久性に優れた次世代型人工肺およびECMO/PCPSシステムの開発と製品化. 医機学, 82 (6); 472-478, 2012.
- 10) 西田 博, 遠藤真弘, 小柳 仁:PCPS—最近の動向—. 循環制御, 16 (2); 180-186, 1995.
- 11) 大島弘之, 東條圭一, 宮地 鑑, ほか:エクセラン Kids 長期使用時における性能に関する検討—従来使用品との比較—. 体外循環技術, 39 (2); 213-213, 2012.
- 12) 片桐伸将, 水野敏秀, 兼坂 茂:PCPS施行時における経時的な人工肺 wet-lung の進行とガス交換性能低下に関する検討—人工肺ガス吹送圧力モニタリングによる有効膜面積の連続的推定—. ICUとCCU, 32 (6); 513, 2008.
- 13) 東條圭一, 古平 聡, 小原邦義, ほか:PCPSにおけるMENOX AL-6000αのガス交換能の検討. 体外循環技術, 28 (1); 49-51, 2001.
- 14) 芦村浩一, 田代雅文:低酸素症および高炭酸ガス血症に対する人工肺補助. サーキュレーション・アップ・トゥ・デート, 3 (2); 275-279, 2008.

[本論文の要旨は第39回日本体外循環技術医学会大会にて報告した]