

循環動態と代謝

— $\dot{V}O_2$ 連続計測と関連して—

埼玉医科大学第一外科

木村壮介

1. はじめに

重症弁膜症や複雑心奇形等に対する開心術の手術成績向上は、心筋保護法や手術手技の進歩に加え、術中術後管理の進歩による部分も大であることは明らかである。これは、Criticalな状況に対する、病態の解析、治療法の確立に平行して、技術面の開発による所も多い。具体的に示せば、①重症患者のモニタリングの発達は、我々治療にフィードバックする多くの情報を提供してくれるようになったこと。通常の心電図や血圧のみでなく、心拍出量(CO)、肺動脈楔入圧(PCWP)、さらに不整脈の自動記録等が当り前の道具として装備されて来た。②多種類のカテコラミン類、抗不整脈剤、末梢血管拡張剤、さらに③微量を正確に注入可能とした自動輸液ポンプ等医療機器の発達も大きな要素である。これらの技術面の進歩は、病態解析の確立と共に、術後管理を理解しやすくするのに役立って来た。多くの施設から、「ICUマニュアル」や「指標」といった形で明解で具体的な治療指導書が出され、経験の浅い者でもそれなりに納得して正しい管理が可能になっている。

これらをふまえた上で、最近の傾向は、より高齢化、重症化した症例に対しても手術を適応可能になったため、以前では起きなかった様な手術死亡例が目立つことである。埼玉医科大学第一外科の1989年1年間の虚血性心疾患手術例を例にあげる。総症例数80例、何らかの形で緊急手術として行ったものは24例(30%)、年齢70才以上は9例(11%)であった。術後30日以内の死亡は8例(10%)で、死亡原因は、心臓死3例(Slow Rupture 1例、不整脈死1例、術前すでに心室細動1例)、多臓器不全3例、感染2例(肺炎1例、MRSA感染1例)である。これを見ると、術後の心臓死は2例(2.5%)で多臓器不全、感染が8例中5例を占めていることがわか

る。これらは、循環動態を見るかぎり、なんとかCriticalな時期を乗り切った後、徐々に多臓器不全へ陥った症例や、急性期においても従来の心拍出量、血液ガス等のデータ上は良好であっても末梢循環、組織循環が悪いという印象を呈した症例が多い。

ここで、従来の循環管理の基礎となっている心臓を中心とした、CO、PCWPや酸素の供給としての動脈血酸素飽和度(So_{O_2})のみでは不十分と考え、組織の代謝をモニターするという意味で、全身の酸素消費量($\dot{V}O_2$)、炭酸ガス産生量($\dot{V}O_2$)の連続計測を行い、重症患者のモニターとしてその意義を考察した。

なお、今回示した装置は、筆者が自治医科大学在籍中、同大学呼吸器内科吉良枝郎教授の指導の下に、東芝総合研究所との共同研究にて開発、製作したもので、臨床データも自治医科大学の症例が含まれている。

2. 装置(呼吸機能監視システム)

重症で、気管内挿管下に呼吸管理されている患者を対象に、ベッドサイドモニターとして開発された。気管チューブと人工呼吸器蛇管の間にプローブをセット、気道流量(Flow)、気道内圧、及びサンプリングチューブを介してガス組成の計測を行う。本体はブラウン管、キーボード、プリンター、質量分析計、及びコンピューターから成っている。プローブは重量約100gの透明、円筒型、死腔約10mlで気道を全く障害しない構造になっており、モニターとして長時間の連続使用に耐えられる構造になっている。

システムの機能は図-1に示してあるが、コンピューターはデータの記憶処理を行うだけではなく、各計測器の自動校正、リアルタイム補正等を行い、測定そのものを制御し精度を維持している。気道内圧測定には、零点

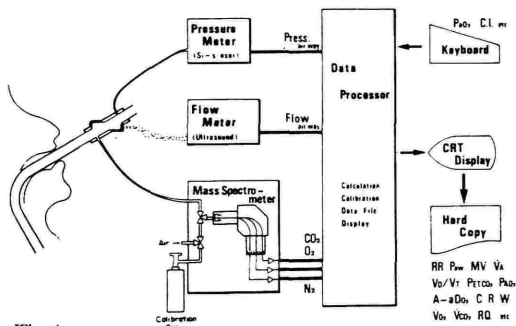


図-1

のきわめて安定した半導体圧力センサーを使用、呼吸流量は、30度の角度で気道に斜に対向する振動子により超音波を発信、呼吸気流によりその伝播時間が変化することを利用した、超音波伝播時間差方式を取り入れ、定常流に対し、 $\pm 3\%$ 以下の誤差でFlow及び換気量 (Volume) を測定可能とした。ガス組成により生じる伝播時間のズレは、両方向の伝播時間とその時間差の両者を測定し、リアルタイムで補正することにより解消した。質量分析計は、標準ガス (2種) とair により定期的自動校正を行い、さらに比例出力補正を行うことにより、気道内圧に関係なく、装置駆動開始時より 1 mmHg 以内の誤差で CO_2 , O_2 , N_2 を測定可能とした。

データ処理を図-2に示す。気道の圧力、Flow、及び CO_2 , O_2 , N_2 をそのままモニターとして表示する以外に、これらのデータを分析することにより、図に示す15項目を各々5分毎に1個のデータとして4日間ファイル可能としている。Off-lineのデータを与えることにより、種々の値を算出可能とした。

Data Analysis & Display

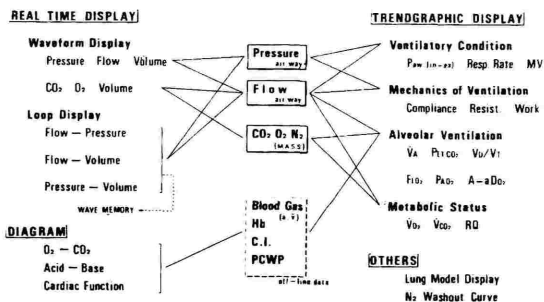


図-2

3. 開心術後の臨床例に見られた代表的な波形、データ

a) 気道内圧、Flow、Volume及び CO_2 , O_2 の波形 (図-3)

開心術後Servo 900BにてControl Ventilation 中の波形。Pressure, Flow, Volume表示は呼吸状態の異常、自発呼吸の出現等をモニターするのに適しており、 CO_2 , O_2 , VolumeはWeaning 中や慢性呼吸不全を基礎に有する患者のモニターに適している。各々のディスプレイ右上に FiO_2 , V_T , MV, P_{ET} CO_2 等を数値として表示もしている。

WAVEFORM Display

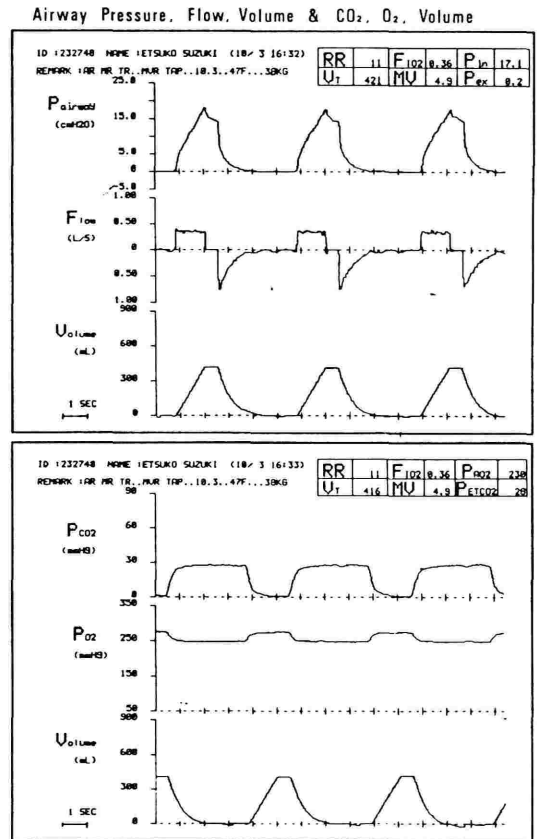


図-3 上段：気道内圧、Flow、Volume

下段：気道ガス分圧 Pco_2 , Po_2 及びVolume

47才人工弁置換後症例

b) 気道内圧、Flow、VolumeのLoop波形 (図-4) 各々の2要素をX-Y表示 (Loop表示) としたモニター、各々のdot は40msec毎に表示するため、時間的な要素も表現している。Weaning 時や (Flow-Pressure Loop)、コンプライアンスの経時変化 (Pressure-Volume Loop) を検討する上で有用。

上昇したことを示している。

d) 急激な血行動態変化と $\dot{V}O_2$, $\dot{V}CO_2$ (図-6)

42才、重症弁膜症の術後、頻発するPVC からVFを併発、各々心マッサージ、DC等により蘇生に成功した際の血圧、 $\dot{V}O_2$, $\dot{V}CO_2$ の変動を示す。急激な血行動態の変化にはそれに対応する急激な $\dot{V}O_2$, $\dot{V}CO_2$ の変化が認められるが、VFをくり返すうちに、徐々に $\dot{V}O_2$, $\dot{V}CO_2$ は低下し、これは血行動態を含めた全体の印象と非常によく一致していた。

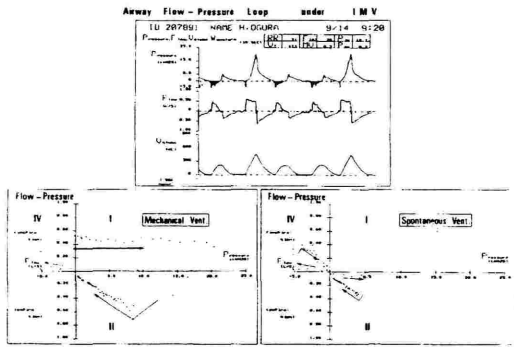


図-4 IMV(Intermittent Mandatory Ventilation)にて Weaning 中のFlow-Pressure Loop

c) 開心術後のトレンドグラフ (図-5)

4才男子、肺動脈弁膜症症開心根治術後気管チューブ抜管までの経過を示す。気道内圧はPin-Pex で示すが、自発呼吸出現による陰性化を認める。CPAPへの移行と共に呼吸数は上昇、分時換気量はこの場合、多少減少している。 $\dot{V}O_2$, $\dot{V}CO_2$ は術後4~5時間で上昇を認め、RQは漸減、自発呼吸出現により再び $\dot{V}O_2$, $\dot{V}CO_2$

One-Day Trendgraphs after Cardiac Op.

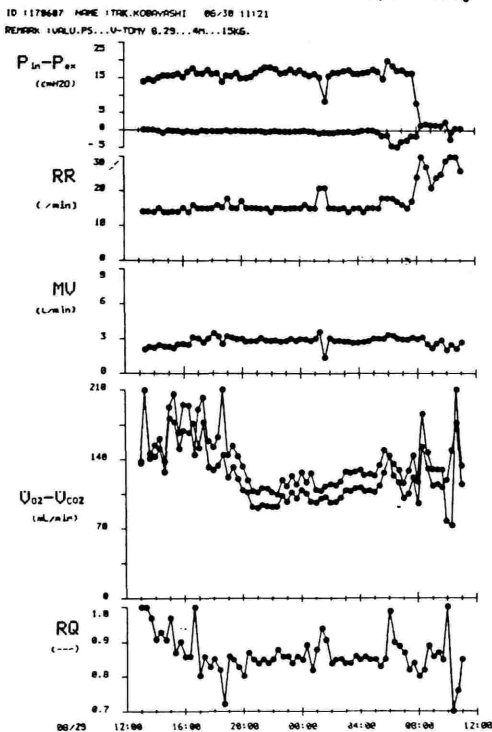


図-5 開心術後のトレンドグラフ
Pin(吸気Peak圧), Pex(呼気終末圧)
RR(呼吸数), MV(分時換気量), RQ(呼吸商)

頻発した VF と血圧, $\dot{V}O_2$, $\dot{V}CO_2$ の変動

42F Re-MS+TR+Cachexia, MVR+TAP

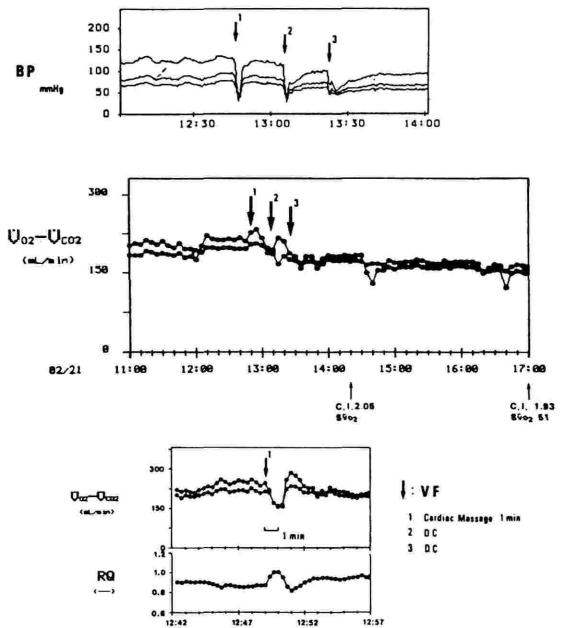


図-6

4. 開心術後 $\dot{V}O_2$, $\dot{V}CO_2$ の特長

ほぼ連続して行った開心術症例15例に、術後ICUにおいて $\dot{V}O_2$, $\dot{V}CO_2$ の連続計測を行った。症例は、表-1

Continuous Measurements of $\dot{V}O_2$, $\dot{V}CO_2$ following Cardiac Surgery

No.	Diagnosis	Age, Sex	Operation	Perfusion Time	Ap. Clamp Time	React. Temp.	Remarks
Congenital							
1	PS	4 M	Valvulotomy	60	—	29	
2	ECD	10 F	Radical	140	85	26	
3	ASD, MR, PS	11 F	Closure, MAP	93	—	26	
4	ASD, TR	53 F	Closure, TAP	83	—	30	
5	DORV	7 M	Radical	314	133	24	
6	TOF	3 M	Radical	185	50	20	
7	ASD, PH	44 F	Closure	106	—	29	Cachexia +
Acquired							
8	MS (post CMC)	50 M	MVR	140	56	25	
9	AR, MS	56 M	AVR, DMC	190	100	25	
10	MR, TR, Ar	47 F	MVR, TAP	170	87	27	
11	OMI, LVA	62 M	Aneurysmectomy	310	41	28	*
12	post MVR, LVA-Thromb.	37 F	AVR, Thrombectomy	274	150	25	
13	MS, TLA, LVA-Thromb.	63 M	MVR, TAP, Thrombectomy	178	91	25	Low Deflection +
14	MS	54 F	MVR	147	80	25	
15	MS (post DMC)	46 M	MVR	310	150	26	

表-1 開心術後 $\dot{V}O_2$, $\dot{V}CO_2$ 計測症例

に示す通りで、先天性7例、後天性8例、全例退院し社会復帰している。表中「*」印の3例は、ICU入室時 $\dot{V}O_2$ が $100\text{ml}/\text{min}/\text{M}^2$ 以下であった症例である。

術後の血行動態、先天性後天性、年齢等で比較したが差はなく、ICU入室時 $\dot{V}O_2$ $100\text{ml}/\text{min}/\text{M}^2$ にて2群に分けて見た(図-7)。ICU入室時 $\dot{V}O_2$ $100\text{ml}/\text{min}/\text{M}^2$ 以上の症例は血行動態等の急性変化に関連なく、 $\dot{V}O_2$ は4~5時間で徐々に最高値を示し、全体としてゆるやかな安定した変化を見せた。 $\dot{V}O_2$ が100以下の群は3例のみであるが、7~8時間で安定するまで時間を要し、血行動態に一致する様な変化が見られた。この3例は各々、術前Cachexia、術後末梢循環不全(図-8症例)、及び術前うっ血性肝障害を呈した症例であった。

前記の術後に末梢循環不全を呈した症例を図-8に示す。62才男陳旧性心筋梗塞、左心室瘤にて左室瘤切除を施行した直後の記録であるが、モニター上の血圧波形はSpike形で、手足及び直腸温も低くLOSと考えカテコラミン類、Ca拮抗剤等にて対処し徐々に改善を見た。末梢循環の改善と $\dot{V}O_2$ 、 $\dot{V}CO_2$ の変化は非常によく一致していた。又、急に覚醒し、Shiveringを呈した際、一過性の血圧上昇とShiveringに一致した $\dot{V}O_2$ 、 $\dot{V}CO_2$ の上昇は興味深い所見であった。全体の経過を見ると、Shiveringの際の血行動態から、心機能自体はその時点では予備力を回復しており、手術直後の回復過程でもっと末梢循環改善のための管理を充分に行うべき状況であったと考えている。

$\dot{V}O_2$, $\dot{V}CO_2$, & Hemodynamic State following Cardiac Surgery

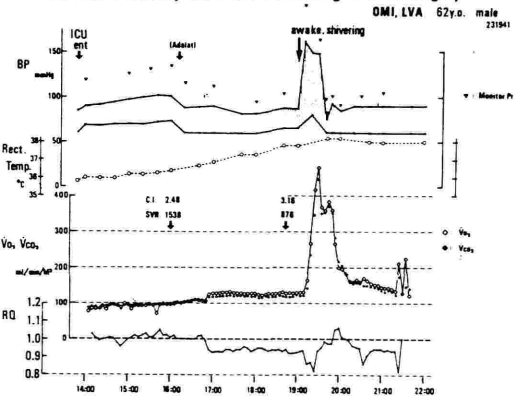


図-8 開心術後、末梢循環不全症例

図-9は43才男、ファロー四徴症術後に重症右心不全を来した際、不整脈に一致して血圧の周期的な変化が見不整脈に伴う血圧変動に一致した $\dot{V}O_2$ の動き

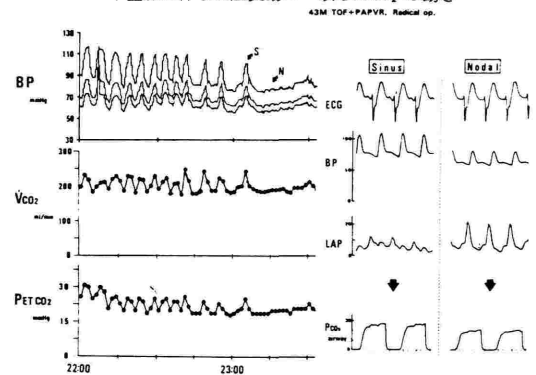


図-9 重症右心不全、不整脈に一致した血圧、 $\dot{V}CO_2$ の変化

られそれが $P_{ET}CO_2$ 、 $\dot{V}CO_2$ にも反映されていた。Sinus Rhythmでは血圧は保たれ循環状態も良いが、Nodal

5. 重症例に見られた $\dot{V}O_2$ 、 $\dot{V}CO_2$ の変化

Rhythmになると左房圧波形にCannon Wave 出現、血圧は低下、安静安定時であるのにほとんど同時に $P_{ET}CO_2$ も低下した。不整脈による組織循環の変化が表われたものと言える。

6. 血行動態と組織代謝

血行動態がそれほど悪化しないうちは、組織代謝は血行動態によって大きく左右されることはない。通常、混合静脈血酸素飽和度(SvO_2)が70%以上を維持していることは、循環の側が十分な余裕をもっていることの表われである。人工呼吸下で安静にしている場合、 $\dot{V}O_2$ 、 $\dot{V}CO_2$ 通常ゆっくりとした変動を示し、手術侵襲からの回復、体温、輸液内容等によって左右されると言われている。今回の経験でもほぼ同様の傾向が見られ、Cachexiaからの回復期、Sepsis等で高値を示した。

これらの関係を理解するためには、図-10の様な O_2 Transport に関する図式が有用である。ヘモグロビン濃度(Hb)、動脈血酸素飽和度(SaO_2)、及び心拍出量(CO)によって規定される単位時間当りの酸素運搬量は、Capillary において組織へ一部が移動し、通常これは組織酸素需要量(O_2 Demand)に等しいことを示している。

Oxygen Transport and Consumption

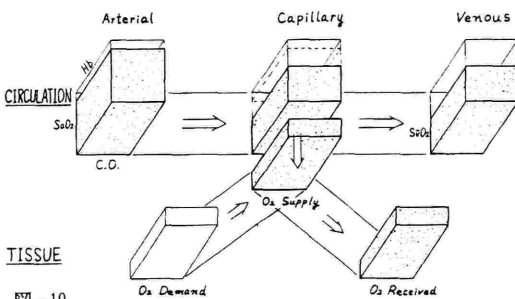


図-10

又、 SvO_2 を規定するHb, C, O₂, SaO_2 、 $\dot{V}O_2$ の変動もこの図式で見ると単純明快である。

ところが、循環動態が極端に悪化した状態で SvO_2 が上昇する様な現象はこれでは説明しにくい。図-9の様に血圧の変動がそのまま $\dot{V}CO_2$ に表われる場合、 O_2 Transport の図式は図-11に示す方が真実に近い形になっていると考えられる。組織のガス交換に与かる血流と、与からない血流があることは臨床的には末梢循環不全等に表われ、ショック下でのシャント形成として述べられている。動脈での O_2 Deliveryは充分であり、 SvO_2 は余裕を持っているのに、組織は O_2 Demandに見合った O_2

Supplyを受けていない、つまり組織での酸素のSupply Demand Mismatchが生じていることも説明しやすい。

Oxygen Transport in Severely Ill Patient

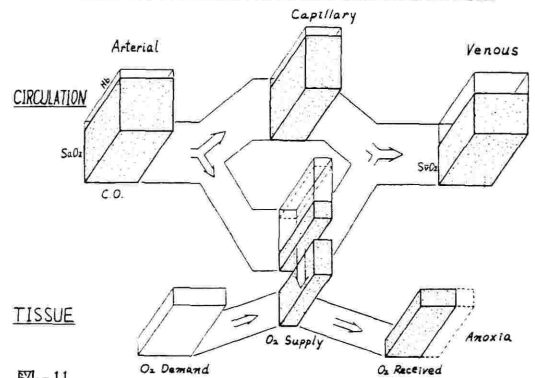


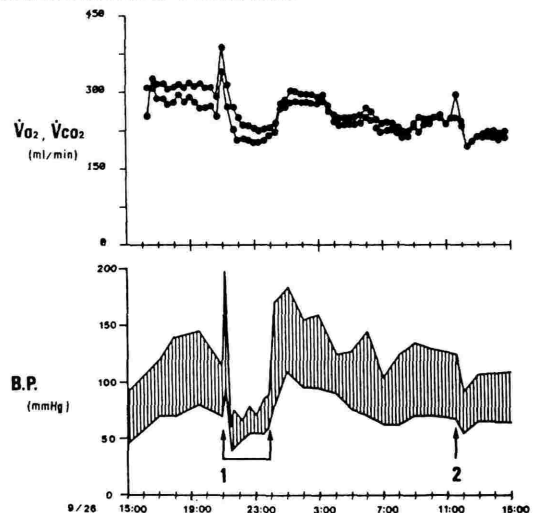
図-11

この様な状況下では、循環動態の変動、特に血圧の変動が有効組織血流量を変化させていると思われる。

組織の O_2 Demandはその時の病態、代謝によって増減し、実際に計測することは難しい。表面にとらえられるのは、計測された $\dot{V}O_2$ 、 $\dot{V}CO_2$ と、もしMismatchが生じていれば、組織のHypoxiaによる所見である。今回の $\dot{V}O_2$ 、 $\dot{V}CO_2$ の連続計測から、組織の循環代謝不全の状態に陥っていると思われる症例において、 $\dot{V}O_2$ 、 $\dot{V}CO_2$ は血圧の変化に一致する様なDynamicな変動を示し、これは組織での O_2 Supply/Demand Mismatchが生じているこ

$\dot{V}O_2$, $\dot{V}CO_2$ vs Blood Pressure under Severe Septic Condition

ID : 229112 NAME : KAZUO TAJIMA (9/27 14:27)
REMARK : R-PUL., CAL., PNEUMONECTHY 9.14...49M...54KG



* 1: Suction → Arrhythmia 2: Sedation

図-12 49才男、右肺全摘後に合併したSepsis.

人工呼吸安静時に見られた血圧、 $\dot{V}O_2$ 、 $\dot{V}CO_2$ の変化

との表われであると考えられた (図-12)。

$\dot{V}O_2$, $\dot{V}CO_2$ の連続モニタリングは組織の O_2 Supply / Demand の Mismatch を感知することによって、組織循環を念頭においた治療に役立ち、さらには多臓器不全等の予防のための治療へ結びつく可能性があるという点で新たな意義があると考えられた。