

# 心肺蘇生と血液ガス そして麻酔救急集中治療医

藤田保健衛生大学医学部麻酔学 (Surgical ICU) 教授 貝沼 関志



藤田保健衛生大学病院



貝沼 関志  
かいぬま もとし

藤田保健衛生大学医学部麻酔学 (Surgical ICU) 教授

1979年 名古屋大学医学部医学科卒  
卒後、名古屋掖済会病院、名古屋大学医学部付属  
病院、名古屋第一赤十字病院を経て現職。  
専門領域は麻酔・救急・集中治療。

臨床麻酔では特に名古屋大学で肝静脈血酸素飽  
和度持続測定の開発と応用に力を注いでこられま  
した。

現在は集中治療室に専従し心臓血管外科症例を  
中心としたcritical careのチーフとして多忙な生  
活の毎日をご過ごされておられます。

編著  
麻酔・救急・集中治療 専門医のわざ  
麻酔・救急・集中治療 専門医の極意  
麻酔・救急・集中治療 専門医の秘伝

## CONTENTS

心肺蘇生と血液ガス  
そして麻酔救急集中治療医 1

藤田保健衛生大学医学部麻酔科・Surgical ICU  
貝沼 関志

血液ガスに参画した人たち 7

Topics  
ACUTE-CARE 支度サイトリリース 8

QA[Quality Assurance]  
とは、「常に質(内容)を確認し、  
継続的な向上を目指す」という  
意味で、Radiometer™の基本  
コンセプトです。

## 心肺蘇生と血液ガス そして麻酔救急集中治療医



### 1、麻酔科医が診療の中で培った学問的伝統はすごい

みなさん、こんにちは。藤田保健衛生大学医学部麻酔科・Surgical ICUの貝沼潤志です。このような場にご招待いただき光栄です。私は1979年に名大医学部医学科を卒業しました。そのころは名大に救急やICUはなく、麻酔科も手術麻酔とペインクリニックで手一杯の状態でした。一方、お隣の名市大では日本で先頭を切ってICU診療がおこなわれ、全国から若い医者が集まり、麻酔科の率いる救急集中治療のメッカとなっていました。当然のように小生も惹かれましたが、名大で何とかICUを立ち上げようと頑張っていた先輩がいたことと、呼吸や循環を生理学的に極めてエレガントな数式を用いて研究、解説してくれる物理学者のような先輩に出会ったことから名大麻酔科に入りました。もともと、医学は理系のはずなのに、高校世界史のような暗記物に堕している現状に不満が募っていた僕の内心をこの先輩は刺激しました。麻酔もICUも呼吸も循環もそのことの私には極めて理論的な対象で、先輩に倣って自分で理論式をたてて学会で発表したりしていました。麻酔科学のもっている学問はすごいと思いました。学問的興味をここまで満たしてくれた麻酔科学に愛着を持っています。

### 2、心肺停止での許容時間は7分半よりはるかに短い — 手術麻酔での修練

酸素代謝の維持は生命維持とほぼ同義です。にもかかわらずヒトでは体内に極めて僅かの予備の酸素を蓄積しているに過ぎません。すなわち、成人で血液中のヘモグロビンとの結合と血液溶解酸素、肺残気量、ミオグロビンとの結合、組織間液での溶解部分を合計しても1500ml程度と推算されています。ヒト成人の酸素消費量を200ml/分と見積もっても7分半しかもちません。しかも、この話は、ミトコンドリアで体中の酸素が残らず消費されることを前提としています。室内気から肺胞、動脈血、組織、ミトコンドリアにまで至る巨大な酸素分圧勾配（oxygen cascade）のある実際のヒトでは、7分半よりは遙かに短い時間で低酸素性臓器障害を発生するはずで、ミトコンドリアに酸素を送り込むというような感覚と習慣をつけてくれるのは手術麻酔の経験が最適です。

### 3、ヒトが地上に出てきた

手術麻酔をやっていると人間がもっと長く低酸素に耐える方法をどうしても考えてしまいます。ヒトがなぜ酸素の予備を少なくしか持たないかは、進化の過程でヒトが地上に出てきたことと因果関係があるだろうな、などと麻酔をかけながら考えます。すなわち空気は水よりはるかに酸素含有量が多く、また、空気は水より軽いので動きやすく、少ない呼吸筋の仕事で多くの酸素を取り入れることが出来る。海中のクジラは大量のヘモグロビンに酸素を蓄え、アザラシは潜水中に巨大な脾臓が収縮しヘモグロビンを循環中に放出することによって長時間の無呼吸に耐えることが出来る。このことは蘇生と麻酔はやはり直線的につながっています。

### 4、ヒトは大きい — 大きいから心臓が要る

また、酸素分圧勾配についてはヒトの体のサイズに恐らく関係するだろうと考えます。なぜ循環などというものがあるのか。高圧酸素室でなら血液は要らないのではないのか、などとも。

ごく小型の生物では、酸素は対表面から拡散により吸入する分だけで十分です。球形の生物の場合、この拡散だけで十分な酸素が獲得できる限界は直径1mm以下ということです。生物のサイズが大きくなるにつれ、酸素消費量は基本長の三乗に比例するが酸素摂取量は基本長の二乗に比例するといいます。生物が大きくなればなるほど酸素消費に比して酸素摂取のためのシステムに工夫がいるというわけです。ヒトの酸素摂取装置の肺胞の厚さは約0.5 $\mu$ mで皮膚よりもはるかに薄く、しかも面積は100-200 $m^2$ で皮膚表面よりも二桁大きくなりました。このような巨大な酸素摂取装置から取り込まれた酸素はミトコンドリアにまで到達しなければならないため、循環というシステムが生まれたのです。このシステムはヘモグロビンという特別の酸素結合装置までも含有しています。

### 5、心肺停止を酸素からみる

心肺蘇生とは麻酔科医にとってはまず理論の問題でなく、いつ自らの行為でまたその失敗からおこるかもしれない実践的課題です。また、まずは、酸素摂取と酸素消費のシステムの破綻を7分半よりもはるかに短時間でどのように取り戻すかという問題でもあります。

承知のように、酸素運搬量 (ml/分) =  $CaO_2$  (ml/dl) \* 心拍出量 (L/分) \* 10

ここで、 $CaO_2$  (ml/分) =  $1.34 * Hb$  (g/dl) \*  $SaO_2$  (%) / 100 +  $0.003 * PaO_2$  です。

この基本式から酸素摂取と酸素消費のシステムの破綻の内容を整理すると、① $PaO_2$ の低下 ( $SaO_2$ の低下)、②ヘモグロビンの低下、③心拍出量の低下、④酸素摂取の障害、⑤酸素需要の増大に酸素供給が追いつかない、のどれかが起こっていることとなります。とりわけ心肺蘇生においては、③の心拍出量の低下はおろか心停止ではこれがゼロとなり、呼吸停止では④がゼロとなる事態ということになります。

ここで、心肺蘇生時にどれだけの酸素運搬量が必要か、という問題は、酸素消費量の限界点の設定が難しいことから、一般的な基準を示すのは容易ではありません。病態はケースバイケースであるため、一般的な基準を示すことに意味はさほどないとも言えます。心肺蘇生中の心拍

出量はきわめて低く、わずか $0.7 \pm 0.3 L/min/m^2$ しであると言われていています。しかし酸素消費も多くは下がっており低体温も加味するとさらに減少しています。

### 6、二酸化炭素産生は酸素消費

また麻酔科医は酸素を送るだけではなく二酸化炭素を患者からうけとりこれをソーダライムという原始的な装置によって取り除いています。好気性の条件では酸素消費は二酸化炭素産生と一体です。酸素消費量と二酸化炭素産生量は呼吸商Rによってリンクしています。一方で酸素と二酸化炭素はかなり違った特徴を持ったガスでもあります。酸素は、水への溶解性が低くヘモグロビンを介して酸素は運搬され、また組織や膜への酸素の透過性は低い特徴を持っています。それとは逆に二酸化炭素は、水への溶解度が酸素の24倍高く重炭酸イオンあるいはカルバミノヘモグロビンを介して二酸化炭素は運搬され、また組織や膜への二酸化炭素の透過性は酸素の20.5倍高い特徴があります。また、二酸化炭素による重炭酸の濃度変化はそのまま塩基平衡に大きく影響することとなります。 $Paco_2$ はたんなる老廃物でなく、各臓器での特異な血流制御をつかさどっている生体での恐らくもっとも重要なメディエーターでもあります。



## 7、心肺蘇生と酸素、二酸化炭素

通常の場合、心停止時の心肺蘇生時の肺換気量は比較的多く心拍出量は比較的少ない病態となります。肺でのガス交換が大きく障害されていなければ心拍出量、肺血流量が少なくても動脈血酸素飽和度は高く保たれます。一方二酸化炭素は心拍出量、肺血流量が少ない場合換気量が多くても二酸化炭素呼出の絶対量は少ないままとなります。したがって、混合静脈血の二酸化炭素分圧は高く動脈血の二酸化炭素分圧は低いという解離現象が生じます。動物実験によれば心拍出量が少ないほど解離の程度は大きいことがわかっています。末梢組織の酸塩基平衡はこの混合静脈血の二酸化炭素分圧に依存する部分が大きいため、動脈血のpHによっては判断ができないこととなります。このあたりは安全な麻酔になれてしまうと経験できないこととなります。

## 8、救急集中治療も行う麻酔科生活

さて、また私の「生い立ち」にもどります。麻酔科に入って学問的理論的興味が満たされたなかであっても、臨床での手術麻酔のなかには救急集中治療の興味を持続させるのは容易でなく、麻酔をかけつつも心臓外科の一員のようなありがたい待遇を受けてICUを体験したり、救急外科的興味は、麻酔科医に週一日許された出張日に外科病院で外来や手術や救急診療をすること、外科当直を週に2-3回も行うことでまかっていた。若いだけあって体力がありました。救急集中治療に打ち込んでいる今にとってこの経験は宝物です。外科手技だけでなく、診断がすでに付いた患者の手術麻酔に慣れてしまうと、いつのまにか医者にとってもっとも原点ともいえる初期診断能力が欠けてしまうという医者としては致命的なことが起こるからです。

## 9、麻酔科診療の栄光と宿命

通常の手術麻酔をかけるために医師として自己を磨くための臨床的修練内容は外科、内科に比べてはるかに深みが無いに気づきます。麻酔科医として残念ですがここは客観的に素直に認めざるを得ません。これは内科・外科診療の基礎である麻酔科診療の栄光と裏腹の宿命に起因するものです。しかしこの宿命を逆手にとると内科・外科では出来ない新しい分野に挑戦するエネルギーと時間を麻酔科では得ることが出来ます。私は肝静脈に内頸静脈からカテーテルを入れることによる肝静脈酸素飽和度モニタリングの臨床的確立に熱中しました。名大と藤田保健衛生大学で600例以上の患者にインフォームドコンセントを得て事故なく実施しました。麻酔が外科の助けをする日のあたらぬ下請けでなく、手術侵襲に対して患者を臓器ごとにreal-timeに守るといふ醍醐味を日々実感しました。



## 10、critical care physicianこそ麻酔科の魂の源泉—人工呼吸からPCPSへ

手術麻酔が安全に施行できるようになり、蘇生ということが手術室で経験することが少なくなってきた今こそ、麻酔科医がその本来の正統的な魂の源泉であるcritical care physicianに戻る時代が来ていると思います。麻酔科医は現在麻酔科医の若手によってどんどん進歩している手術を快適に受けられる麻酔技術の改良に更に精通する必要があると同時に、初期救急やICUでの敗血症、臓器不全に学問的にまた現場で具体的に戦えるように自らをトレーニングすべきです。麻酔科の学問的伝統は厚く、また麻酔科医に流れる患者を守るという魂は深く麻酔科医に根付いており、その深い部分で生きていこうとする麻酔科医の今後の方向と言うべきです。その意味で私は麻酔科にとっても誇りを持っています。我々は麻酔科の魂を正統的に受け継ぐ麻酔救急集中治療医であってつまりcritical care physicianなのです。

さて、このような経緯を経て、今私はICU専従です。経験したPCPS 症例はこれまで16例です。心マッサージと人工呼吸だけであった蘇生の時代はもう過去のもの実感します。血液ガスと呼吸循環生理をPCPSから再構成するのが当面の私の課題です。



### 文獻

福家伸夫

体内での酸素運搬と酸素消費. 救急医学  
30:811-815,2006

本川達夫

ゾウの時間、ネズミの時間；サイズの生物学、中央公論社、東京、1992

岡本和文

心機能と肺機能の相互作用. 救急医学  
30:789-793,2006

小竹良文

二酸化炭素の運搬と体内への移動. 救急医学  
30:801-803, 2006

酸素の運搬と体内への移動. 救急医学  
30:795-800, 2006

藤田保健衛生大学医学部麻酔科  
Surgical ICU (外科系集中治療室)  
貝沼 関志

〒470-1192

愛知県豊明市杏掛町田楽が窪1-98

Tel: 0562-93-2273 or 2270

Fax : 0562-93-2246

mkainuma@fujita-hu.ac.jp

## 血液ガスの歴史に参画した人たち

帝京大学教授 諏訪 邦夫

**左:ブラック** Black, Joseph (1728-88,英)

**右:プリーストリー** Priestley J.(1733-1804,英)

酸素は、1770年代にイギリスのプリーストリーとスウェーデンのシェーレとが独立に発見している。前者は、「閉鎖空間でものを燃やすと酸素が消費されて動物が生きられなくなり、植物を入れると再び生きられるようになる」と記述している。二酸化炭素はそれより少し前の1750年頃に、ブラックが発見している。ブラックは、当時エジンバラ大学の医学生だったという。



**左:ラボアジエ** Lavoisier A (1743-1794,仏)

**右:マグヌス** Magnus HG (1802-1870,独)

ラボアジエは酸素の発見ではプリーストリーとシェーレに遅れたが、「酸素という物質を発見」したに留まらず、「化学反応における酸素の意義」を正しく把握し、さらに「生物の代謝と物質の燃焼は基本的に同一の現象」と洞察し、物質と酸素が反応して、二酸化炭素ができることも見抜いた。マグヌスはドイツの物理学者兼化学者で、血液ガスの定量的な測定を試みて、「酸素は末梢で消費されて二酸化炭素を生ずる」ことをデータに基づいて主張した最初の人。「マグヌス効果」の発見者。



**左:マイヤー** Mayer JL(1830-1895,独)

**右:ルードヴィッヒ** Ludwig C (1816-1895,独)

マイヤーは血液ガス測定をさらに進め、マグヌスが主張した「酸素は末梢で二酸化炭素に転換する」ことを確立した。血液の酸素は、物理的に溶けているだけでなく化学的にゆるい結合が存在し、可逆的に結合と分離(つまり現在の「酸素解離」の基本)を打ち立てた。元素の周期律をメンデレーフと同時に、独立に発見した点でも名高い。ルードヴィッヒはマイヤーの研究に刺激されて、血液ガスの研究を開始して含量測定を確立した。弟子のセチェノフと「血液ガスポンプ」を完成させた。これは、ヴァン=スライク法と同様にトリチェリの真空を利用して、血液からガスを取り出すものである。



**左:ボーア** Bohr C (1855-1911, デンマーク)

**右:クロー** Krogh A (1874-1949, デンマーク)

血液ガスの分泌説と拡散説は、19世紀後半のルードヴィッヒとプリューゲルの対立から、20世紀初頭、ボーアとクローという師弟間の争いになった。師のボーアは、ボーアの死腔の式・ボーア効果・ボーア積分と業績が多いが、ルードヴィッヒに学び「酸素の分泌説」にとらわれていた。弟子のクローは、血液中に小さな気泡を導入して平衡させ、その気泡のガス分析で血液のガス分圧を産出することで、血液ガス分圧を正確な測定に成功した。さらに妻のマリーー酸化炭素を用いた肺の拡散能測定法を開発し、「ガス交換は拡散による」ことを最終的に確立した。



**左:ダニール** Danneel L (1867-1941独)のシステム

**右:ハーバー** Haber, F (1868-1934,独)

ネルンストの教室で電極の振舞いを研究して、プラチナ電極で水の電気分解を試みる際、水に酸素が存在すると電流が増加すること、その増加は酸素分圧に比例することを発見し、1897年に発表している。ダニール自身を含めて、いろいろな人たちがこれを組織や血液の酸素の測定に応用することを試みたが、分極の問題が避けられず、結局このダニールの発見は忘れられていった。

ハーバーは、ブンゼンの下で学習し、19世紀終わりにカールスルーエ大学教授になり、1907年に史上最初のガラス電極で水素イオン測定した。「空中窒素を固定してアンモニアを製造」によって、1918年ノーベル化学賞受賞。



**左:ヴァン=スライク** VanSlyke DD (1883-1971,米)

**右:ヘイロフスキー** Heyrowsky J (1880-1967,チェコ)

ヴァン=スライクはロックフェラー研究所の化学分析責任者として、各種の分析法を開発した。酸塩基平衡の概念を打ち立てたと言えよう。また、酸素と二酸化炭素の含量測定に使用する方法は現在も標準手法である。

ヘイロフスキーの開発したポーラログラフィーは、印加電圧と流れる電流の関係から、媒体の化学性を知る手法で、溶液が酸素を含めば、ポーラログラフィーは酸素分圧測定法となる。酸素電極の開発される1950年代まで、これは $P_{O_2}$ 測定の手法の一つだった。



**左:クラーク** Clark LC (1918-2005,米)

**中:ストウ** Stow RW (1916-,米)

**右:セプリングハウス** Severinghaus JW(1922-,米)

クラークは電極と血液サンプルをプラスチック膜で隔てることにより、「酸素分子だけを拡散させ、ダニールの電極で分極を防止する」ことに成功した。

$P_{CO_2}$ 電極は、pH電極を重そう水に浸し、これをプラスチック膜で血液と境をする。血液の $P_{CO_2}$ に応じて重そう水のpHが変化することを $P_{CO_2}$ 変化として記録する。ストウの発明。

セプリングハウスは三つの電極 (pH、 $P_{CO_2}$ 、 $P_{O_2}$ ) をまとめた装置の開発者。温度補正・酸素飽和度の正確な決定・計算尺なども。ストウの $P_{CO_2}$ 電極とクラーク電極を改良し世界に紹介した。



**左:アストラップ** Astrup P (1915-2001、デンマーク)

**右:シガード-アンダーソン** Siggaard-Andersen O (1932、デンマーク)

アストラップはデンマークの臨床化学者。アストラップ法による $P_{CO_2}$ 測定は、「対象の血液を $P_{CO_2}$ 既知の2種のガスと平衡させてpH- $P_{CO_2}$ 関係を確立しておき、血液のpHから内挿で $P_{CO_2}$ を算出する」方法で、 $P_{CO_2}$ 電極に先立つ工夫でありしかも原理的に $P_{CO_2}$ 電極と酷似している。シガード-アンダーソンは、酸塩基の化学を詳細に記述し、各種ノモグラムや図表などで酸塩基平衡の知識の普及と利用に大きな役割を果たした。子息の Mads と共同開発した "Oxygen Status Algorithm" は、Windows版が公開されている。<http://www.osa.suite.dk/> を参照。



## Acute-care 支援サイト 開設のお知らせ

救急処置を支援するラジオメータ公式サイト

アキュート ケア  
**Acute Care** 支援サイト



当社では、この度Acute-care支援サイトを2006年10月1日より新たに開設させて頂いております。

本サイトは、学術資料/文献、ラーニング、製品情報、インフォメーションから構成されており、血液ガス分析及び経皮モニターに携わっておられる方々をご支援させていただくことを目的として制作されております。

今回は、第一段階のリリースであり、内容的にも不十分ではありますが、順次充実させてまいります。今後は「血液ガス博物館」、などのビジュアルに重点をおいたコンテンツや「用語集」などの掲載を予定しております。また、学会セミナーのご案内、トレーニングのご案内などのプログラムをお知らせをいたします。皆様のアクセスをお待ちしております。

**URL: <http://www.acute-care.jp/>**

ラジオメーター株式会社  
〒105-0003 東京都港区西新橋3-16-11  
Tel: 03-5777-3545 FAX: 03-5777-3541

<http://www.radiometer.co.jp/>  
<http://www.radiometer.com/>

●ご意見、ご質問をお寄せください。

**RADIOMETER**  
**COPENHAGEN**

RADIOMETER 株式会社 (デンマーク) の商標です。