

●講 座●

血液ガス

大塚将秀

キーワード：動脈血液ガス分析，分圧，酸素化，酸塩基平衡，アシドーシス，アルカローシス

血液ガスとは

血液ガスとは、血液中の気体成分のことをいいます。中でも生体にとって重要なのは酸素と二酸化炭素なので、「血液ガス」といえば本来はこの2つを指します。しかし、二酸化炭素分圧 (P_{CO_2}) は酸塩基平衡を左右する重要な因子なので、同時に pH も測定し、計算で求めた重碳酸イオン (HCO_3^-) 濃度も加えた4つのデータを求めることを「血液ガス分析」といいます。最近では、ヘモグロビン分画や各種のイオンなども同時に測定できますが、これは「血液ガス分析」に含めません。

酸素や二酸化炭素の量や濃度は、通常「分圧」という概念で表現します。理由は、気体中でも液体中でも使えることと、分圧の高いほうから低いほうへ移動してその速度は分圧の差に比例するからです。分圧の単位には「Pa (パスカル)」「kPa (キロパスカル)」を使うことが推奨されています。現在は移行期間として「mmHg」「torr」の使用も認められています。換算式は、 $1\text{ mmHg} \approx 1\text{ torr} \approx 133\text{ Pa} = 0.133\text{ kPa}$ 、 $1\text{ kPa} \approx 7.50\text{ mmHg}$ です。ここでは、広く用いられている mmHg で記載します。

気体の分圧とは

気体分子は四方八方に運動しています (図1)。容器の壁に衝突して向きを変えますが、このとき壁に力を及ぼします。これを気体の圧力といいます。この容器には二種類の気体 (●4個と●2個) が入っています。

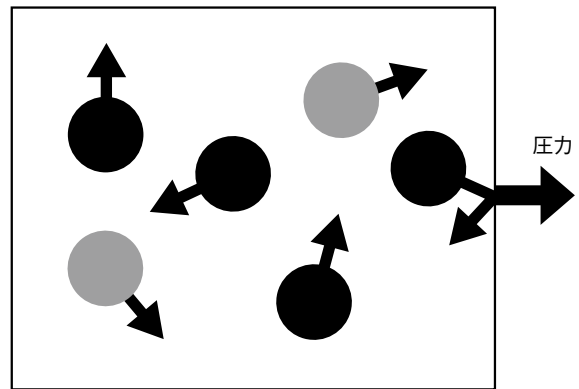


図1 容器の中の気体分子

ランダムに動いていて、壁に衝突したときに圧力を生じる。

すが、いずれもランダムに動いて壁に衝突します。壁にとって●と●の区別はなく、圧力6を受けます。そのうち、4は●が衝突する時、2は●が衝突する時に受ける圧力になります。このとき、●の分圧は4、●の分圧は2と表現します。分圧に関しては、次のことが成り立ちます。

①そこにあるすべての気体の分圧の和は、全圧力と等しい。

$$\text{気体 A の分圧} + \text{気体 B の分圧} + \dots = \text{全圧力}$$

②ある気体の分圧は、全圧力にその気体の濃度を掛けたものに等しい。

$$\text{気体 A の分圧} = \text{全圧力} \times \text{気体 A の濃度}$$

液体中の分圧とは

「分圧」は、液体についても用いられます。図2のように、容器の中に水と空気が入っていると、水に溶けた気体分子●は空気中に飛び出してくる一方、空気中から水中に飛び込んでいきます。しばらく放置すると、両者の頻度は等しくなります。これを平衡に達したといい、水中の分子●の分圧は空気中の分子●の分圧と等しいと定義します。気体と液体が接していれば、分圧の高いほうから低いほうへ分子は移動し、最後は同じ分圧になります。

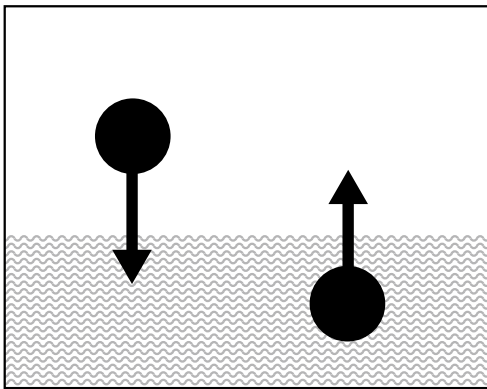


図2 水と空気があるときの気体分子の動き

血液ガス測定の重要性

重症患者が入院すれば、まず血液ガス分析を行います。なぜでしょうか？ それは、血液ガス分析で得られるデータが生命の維持に直結していて、異常時には時間的な猶予がないからです。動脈血の酸素分圧が大きく低下すれば、数十秒以内に生体に変化が現れ、数分で不可逆的な臓器障害が生じます。血液のpHの変化も、全身の代謝に影響を与えます。血液ガス分析は、採血して行うどの検査より緊急性と重要性が高いといえます。

☺☺☺ 採血時の体位は？

体位は肺の換気や血流分布に多大な影響を与えるので、経過を追う場合や他の患者と比較する場合は同一体位で採血します。検査結果には、「仰臥位」や「右側臥位」など体位の条件も一緒に記録します。

血液ガスを測定する目的

血液ガス分析には2つの目的があります。一つは、今の状況が生存に耐えられるかどうかを評価することです。動脈血酸素分圧 (PaO₂) の高度低下や pH の大きな異常は、生命の危機を示しています。直ちに原因を究明して対処することが必要です。もう一つは、肺や心臓、全身の代謝異常を評価することです。

検体の採取

肺や心機能の評価に用いる場合は、安定している状態で採血します。体位変換・人工呼吸器の設定変更・吸入酸素濃度 (F_IO₂) の変更・気管内吸引などから十分な時間が経過した後に採血する必要があります。採血時の体位や人工呼吸器の設定を記録することも重要です。一方、生存に耐えられるかどうかを評価する場合は、必要なとき直ちに採血します。換気条件など関係なく、「今の値」が重要です。

採血には専用シリンジを使用します。検体が凝固しないようにヘパリンを添加しますが、専用シリンジは内部に乾燥ヘパリンが塗られているので、さらに添加する必要はありません。採血時は、シリンジ内に空気が残らないようにします。採血後は栓で密封し、速やかに分析器で測定します。動脈ラインから採血する場合は、十分に逆流させないとライン内のヘパリン生食で希釈されて誤差を生じます。

「酸素化」の意味

「酸素化」という言葉は、2つの意味で使われています。一つは肺のガス交換能力で、もう一つは動脈血の酸素分圧・酸素飽和度そのものです。前者は、F_IO₂ に対してどの程度の PaO₂ が得られるかの評価です。

☺☺☺ 採血にはガラスのシリンジが最適？

以前は、ガラスのシリンジによる採血が標準でした。ピストンの滑りが良く動脈採血がスムーズなこと、空気を遮断できること、シリンジ壁のガス拡散がないことがその理由です。しかし、最近の血液ガス分析専用シリンジは臨床使用に問題なく、割れる心配や洗浄滅菌の手間がないことから、ほとんどの施設で使用されています。

安定した状態で採血し、 F_{IO_2} や人工呼吸器の設定なども考慮に入れます。後者は、全身に運ばれる血液が十分に酸素を含んでいるかどうかという問題で、この場合の「酸素化が悪い」は「低酸素血症」と同じ意味です。全身への酸素供給不足の監視に重点があります。

一般に、 F_{IO_2} を高くすれば PaO_2 も上昇します。たとえば、室内気吸入時の肺炎患者の PaO_2 が50mmHgだったとします。肺の酸素化障害のために低酸素血症になっています。50%の酸素吸入を行ったところ PaO_2 は100mmHgに上昇しました。肺の酸素化障害は残っていますが、低酸素血症は脱しました。この場合、後者の酸素化の定義では、酸素化障害が解消したことになり、肺炎が治ったかのように錯覚する危険性があります。 PaO_2 の低下には「低酸素血症、hypoxemia」という適した言葉があるので、「酸素化」は肺のガス交換能力としての意味に使いたいものです。

酸素化の評価

肺の酸素化能を評価する指標には各種あります(表1)が、どれも F_{IO_2} の影響を完全に排除できません。現在は、計算が簡単でわかりやすく、評価能力も高いP/F比(ピーエフ比)が多く用いられています。陽圧換気を行えば、平均気道内圧(MAP)も酸素化に影響します。これも加味した指標が酸素化指数です。

表1 肺酸素化能の評価の指標

P/F比	PaO_2 / F_{IO_2}
健常者	: 400 ~ 500 以上
急性肺傷害	: 300 以下
ARDS	: 200 以下
人工呼吸を考慮	: 250 ~ 200 以下
R-index	$A-aDO_2 / PaO_2$
M-index	PAO_2 / PaO_2
酸素化指数	$MAP \times F_{IO_2} \times 100 / PaO_2$
$PAO_2 = 713 \times F_{IO_2} - PaCO_2 / 0.8$	
$A-aDO_2 = PAO_2 - PaO_2$	
MAP: 平均気道内圧	

採血シリンジに空気が混入してはいけないの?

空気(P_{CO_2} : 0 mmHg、 P_{O_2} : 150mmHg)が混入すると、検体の P_{CO_2} 、 P_{O_2} は空気の値に近づいてしまいます。

「ヘパリンリチウム」って?

ヘパリンは陰イオンなので、必ず何かの陽イオンが必要です。通常はナトリウムイオンかカルシウムイオンですが、血液ガス分析装置で測定するナトリウムやカルシウム濃度に誤差を生じます。それを防ぐためにリチウムイオン塩が用いられています。

酸塩基平衡の基礎

—なぜ水素イオンが大切か?—

物質は、「分子」の形で存在しています。分子は、いくつかの原子が結合したものです。原子は、中央に陽子と中性子でできた原子核があり、その周囲を電子が取り巻いています。

原子番号1の水素は、陽子1個と電子1個からなる最も小さな原子で、電子1個を放出した陽イオンの状態で安定する性質があります。他の陽イオンは電子を数個失っても、残りの電子があるので原子の大きさがそれほど小さくなることはありません。しかし、電子が1個しかない水素は、それを失うと原子核だけとなり、極端に小さくなります。原子の大きさは $3 \times 10^{-10}m$ 程度、原子核はその10万分の1で 10^{-15} から $10^{-14}m$ 程度です¹⁾。原子を地球の大きさとすれば、原子核は直径100m位に相当します。分子は周囲に電子があるので、その反発力が働いて一定以上の距離に接近することはありませんが、電子を失って10万分の1に小さくなった水素イオンは、周囲の分子と異常に接近します。電荷の間に働く力は距離の2乗に反比例するので、水素イオンが接近した場合は、他の陽イオンに比べて100億倍の電気的な力を与えます。この強力な電気力が分子の形を変え、化学反応性を大きく変化させます。

生体内では、水素イオン濃度のわずかな変化でも多くの化学反応に影響を受け、生命維持に障害が生じます。水素イオン濃度の安定化が求められる理由はここにあります。

酸血症(acidemia, アシデミア)とアシドーシス(acidosis)

血液のpHが7.35より小さいことを酸血症(acidemia, アシデミア)、血液を酸性に傾けようとする病態をアシドーシスといいます。酸血症は症状で、アシドーシ

は病名です。アシドーシスが生じると血液の pH は低下してアシデミアになりますが、代償（後述）が生じると pH は 7.35 を超えて 7.40 に近づきます。こうなれば、もはやアシデミアではありません。pH が 7.35 以下のことをアシドーシスと理解していると、この現象が理解できなくなります。

同様に、血液の pH が 7.45 より大きいことをアルカリ血症 (alkalemia, アルカレミア)、血液をアルカリ性に傾けようとする病態をアルカローシスといいます。

酸塩基平衡

pH・Paco₂・HCO₃⁻のすべてが基準値（表 2）内にある場合を、「酸塩基平衡正常」といいます。いずれかが基準値を外れている場合は「酸塩基平衡異常」です。

表 2 酸塩基平衡に関する基準値

pH	: 7.35 ~ 7.45
Paco ₂	: 35 ~ 45mmHg
HCO ₃ ⁻	: 22 ~ 26mEq/L
BE	: - 2 ~ + 2mEq/L

二酸化炭素(CO₂)は水に溶けて水素イオン(H⁺)を産生する(図 3)ので「酸」です。HCO₃⁻は周囲の H⁺と反応して CO₂ になります。H⁺を吸収するので「塩基(アルカリ)」です。このバランスで血液の pH が決まります(図 4)。

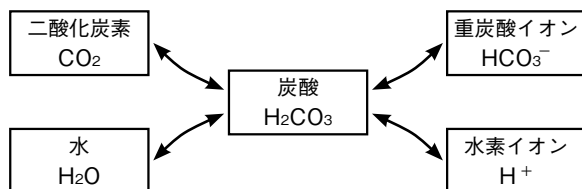


図 3 二酸化炭素と水素イオン、重炭酸イオンの関係

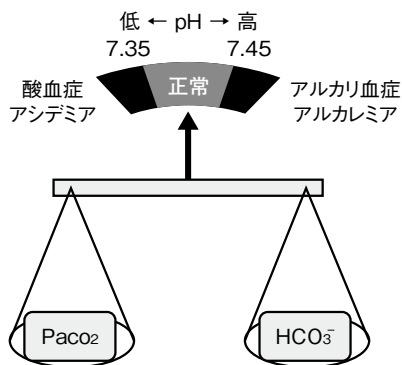


図 4 血液の pH は Paco₂ と HCO₃⁻のバランスで決まる

採血後のシリンジは冷却するの？

白血球は酸素を消費して二酸化炭素を産生します。この反応を抑えるため、測定まで時間がかかるときは冷却します。短時間 (ICU 内での測定など) ならば必要ありません。

CO₂ は呼吸中枢の制御で肺から排泄されるので「呼吸性因子」、腎臓で調節される HCO₃⁻ は「代謝性因子」とよばれます。CO₂ の増加が原因でアシドーシスになっているものを呼吸性アシドーシス、HCO₃⁻ の減少が原因でアシドーシスになっているものを代謝性アシドーシス、CO₂ の増加と HCO₃⁻ の減少の両方が原因となっているものを混合性アシドーシスといいます。アルカローシスは、その逆の状態です。

塩基余剰 (base excess, BE)

塩基余剰の定義は、「その血液 1 L を 37℃ の環境下で二酸化炭素分圧 40mmHg を保ちながら強酸を加えるとき、pH を 7.40 にするために必要な酸の量」です。つまり、代謝性因子の過不足を表現したものです。プラスならば代謝性アルカローシス、ゼロならば代謝性因子はちょうどいいことを示します。マイナスの時は、塩基の欠乏すなわち代謝性アシドーシスであることを示します。

代謝性因子は HCO₃⁻ 濃度で代表されますが、CO₂ は水に溶けて H⁺ と HCO₃⁻ になる (図 3) ので、HCO₃⁻ の濃度は Paco₂ の影響を受けて変化します。つまり、Paco₂ が高ければ、HCO₃⁻ 濃度の基準値も高くなります。これでは代謝性因子の評価が困難です。そこで塩基余剰という概念が考案されました。これを用いれば、Paco₂ の値と関係なく代謝性因子が評価できます。

代 償

酸塩基平衡に異常が生じて血液の pH が変動すると全身の代謝に悪影響があるので、生体は pH を正常範囲に保とうとする反応を持っています。これを「代償」といいます。たとえば、肺の疾患のために Paco₂ が上昇して pH が低下する呼吸性アシドーシスになっていると、しばらくして腎臓が重炭酸イオンの再吸収を増加させて pH を上昇させます。これを「代謝性代償」が起きたといいます。代償反応が起きていないときを

㊦㊧㊨ 採血後のシリンジは、どうやって運ぶの？

水平にして手のひらの間にはさみ、コロコロと転がして運びます。これは、検体を攪拌して均一にするためです。シリンジを立てて転がすと、赤血球が沈降して測定データに誤差を生じます。

「急性」呼吸性アシドーシス、代償反応が生じたあとを「慢性」呼吸性アシドーシスともいいます。

酸塩基平衡の評価

検査データから酸塩基平衡異常を診断する手順を図5に示します。

まず、pHが7.40より大きいかどうかを調べます。大きければアルカローシス、小さければアシドーシスがあると考えます。

次に、その原因が呼吸性因子 (Paco₂) にあるのか、代謝性因子 (BE) にあるのかを調べます。呼吸性因子なら呼吸性○○○、代謝性因子ならば代謝性○○○、両方ならば混合性○○○となります。

最後に、原因となる因子でないほう (呼吸性○○○ならば代謝性因子) が、基準値内にあるかどうかを調べます。基準値内にあれば急性○○○、代償性変化が見られれば慢性○○○となります。

静脈血の血液ガス分析

一般に、血液ガスは動脈血を分析します。肺の酸素化能や末梢に送る酸素量の目安になるからです。それに対して静脈血を分析すると、送った酸素に対して末梢でどのくらい利用したかの目安になります。動脈血と静脈血の差は、末梢の酸素消費量になります。静脈血の酸素飽和度があまりにも低い場合は、末梢で使用する酸素量に対して送る酸素が不足していることを意

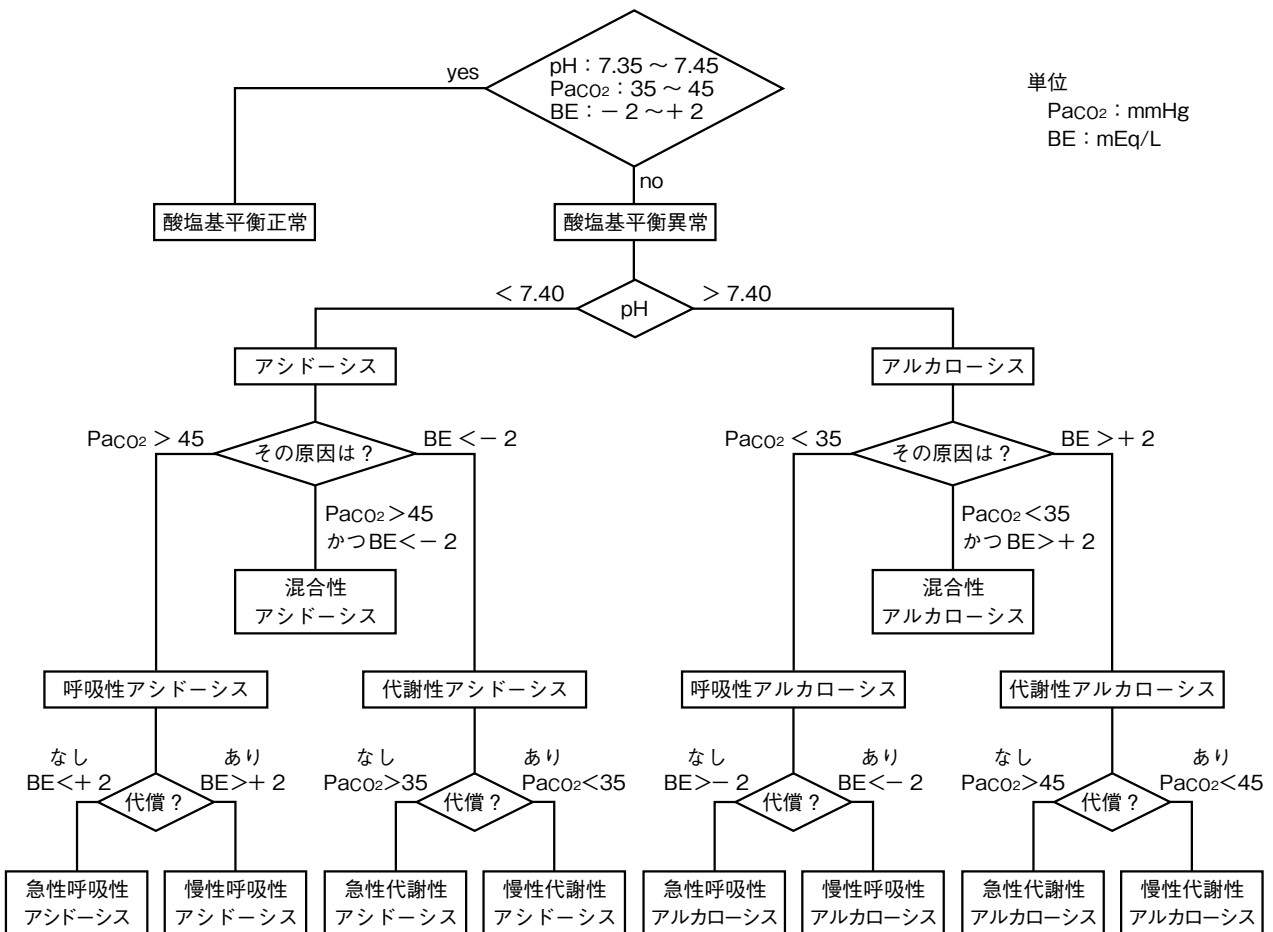


図5 酸塩基平衡異常の診断手順

☺☹️ Base Excess の vt と vi って？

採血した血液そのものの BE を BE (vt) または actual base excess (ABE) といいます。水や電解質は血管内と間質液の間を自由に移動するので、アシドーシスの補正などは間質液まで考えて行います。しかし、赤血球には pH の変動を抑える作用（緩衝作用）があるので、血液で求めた BE (vt) に基づいて間質液まで補正を行うと過剰になります。そこで、生体での動態を考慮して計算した BE を BE (vi) または standard base excess (SBE) といいます。具体的には、ヘモグロビン濃度を 5 g/dL と仮定した場合の BE です。BE (vt) と BE (vi) に差はないことがほとんどですが、両方が計算されている場合は補正の基準に BE (vi) を用います。

味します。強心薬投与や赤血球輸血の必要性の判断材料になります。

特殊な先天性心疾患がなければ、動脈血はどこで採血しても同じ値ですが、静脈血は採血部位で異なります。内頸静脈で採血すれば脳の、冠静脈で採血すれば心臓の酸素代謝の指標となります。すべての静脈血が混合した肺動脈の血液を混合静脈血といい、全身の酸素代謝の指標となります。混合静脈血の採血には肺動脈カテーテルが必要ですが、侵襲が大きいので最近あまり使用されません。それに代わって、上大静脈血の分析が推奨されています。

血液ガスを知る他の方法

血液ガスを知るには採血が必要で、得られるデータも非連続的です。そのため、これを補う各種のモニタリング法があります。

パルスオキシメトリーは、動脈血の酸素飽和度を低侵襲で連続的に知ることができます。循環不全や体動時に測定値が不安定になることはありますが、校正が不要で十分信頼できるデータが得られます。

経皮ガスモニタリングは古くからありますが、反応時間の遅れと信頼性および測定部位の熱傷の問題から、新生児以外ではあまり使用されていませんでした。しかし、 P_{CO_2} を知るだけならセンサー温度を下げられるので熱傷の危険性が低下し、多少の時間遅れも問題にならないことから見直されています。

呼気ガスの分析で、 P_{aCO_2} を推定できます。低侵襲ですが、肺疾患や高度な循環不全では誤差が大きく、気道確保されていないと測定しにくい欠点があります。

血管内電極を動脈内に留置して pH、 P_{aCO_2} 、 P_{aO_2} を連続的に測定する方法もありますが、安定性や誤差の問題があります。

血管内オキシメトリーは、光ファイバー付のカテーテルを血管内に留置して連続的に酸素飽和度を測る方法です。肺動脈カテーテルによる混合静脈血酸素飽和度測定、中心静脈カテーテルによる上大静脈血酸素飽和度測定が普及しています。

参考文献

- 1) 吉沢康和：原子と元素 元素とは何か。東京、講談社、1975、p23-37.