

【はじめに】

“難しいことを難しい言葉で説明することほど難しいことはない（稲盛和夫さん）”

損益計算書（P/L）や貸借対照表(B/S)などの財務諸表、

減価償却費、

売上総利益・営業利益・経常利益・税引前利益・当期純利益といった「利益」

を表す言葉。難しい会計用語はたくさんありますが、経営の原点はシンプルに、

“売上を最大に、経費を最小に”。

血液ガスに関しても、シンプルに説明してみました。

この動画が皆さんのお役に立ち、現場で患者さんに還元して頂ければとても嬉しいです。

適宜バージョンアップしていきたいと思っています。

参考文献も記載するので、時間のある方は是非参考文献も読んでみてください。

“知識は使って意味をなす”

“愛と感謝”

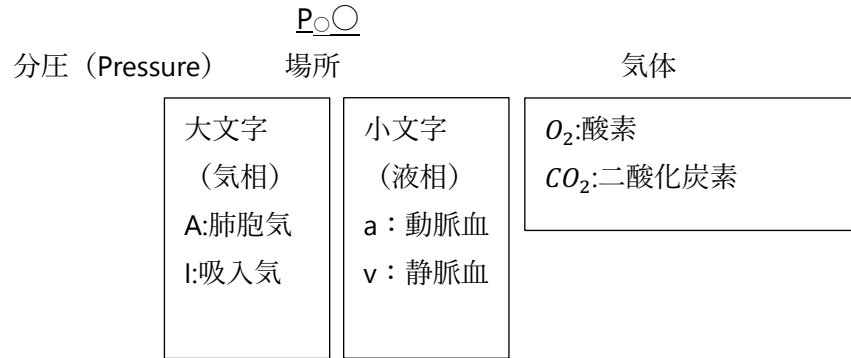
お椀のなかお

中尾裕貴

<血液ガスの4項目>

pH、 HCO_3^- 、 PaCO_2 、 PaO_2
 酸-塩基平衡/呼吸をみる

<血液ガス表記>

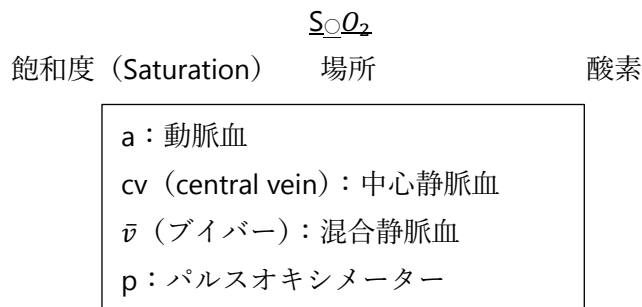


A=alveolar:肺胞 a:artery:動脈
 I=inspiratory:吸入 v:vein:静脈

・ P_{○○} の例

$P_A\text{O}_2$ 肺胞気酸素分圧
 $P_a\text{CO}_2$ 動脈血二酸化炭素分圧

<酸素飽和度表記>



・ S_{○○}O₂ の例

$S_a\text{O}_2$ 動脈血酸素飽和度
 $S_{cv}\text{O}_2$ 中心静脈血酸素飽和度
 $S_p\text{O}_2$ 経皮酸素飽和度
 (パルスオキシメーターで測定)

<呼吸について>

<吸った空気の酸素分圧：海拔 0m では>

- ① 大気の酸素分圧： $760 \times 0.21 \doteq 160 \text{mmHg}$
(大気圧は 760mmHg、21%が酸素)
- ② 気道内の酸素分圧： $(760-47) \times 0.21 \doteq 150 \text{mmHg}$
(吸った空気は加湿される。体温 37°C では 47mmHg の水蒸気圧。)
- ③ 肺胞の中の酸素分圧
 - ・肺の機能はガス交換 (O_2 と CO_2 を交換する)。
 - 交換の比率 (呼吸商; Respiratory Quotient: RQ) は 0.8。
 - O_2 10 個と CO_2 8 個を交換。つまり、

$$\text{使われた } \text{O}_2 = \frac{\text{返ってきた } \text{CO}_2}{0.8}$$

・ CO_2 は“すばしっこい”ので、 $P_A\text{CO}_2 = P_a\text{CO}_2$
よって、

$$\text{使われた酸素分圧} = \frac{P_A\text{CO}_2}{0.8} = \frac{P_a\text{CO}_2}{0.8}$$

(空気の通り道)	(肺胞と肺毛細血管の間のガス交換)
----------	-------------------

[肺胞気式]

$$P_A\text{O}_2 = (\text{大気圧} - 47) \times F_I\text{O}_2 (\text{吸入酸素濃度}) - \frac{P_a\text{CO}_2}{0.8}$$

“大気圧から水蒸気のを引いたうちの 21%が酸素分圧”

“その中からガス交換で使った分を引いたのが肺胞の中に残っている酸素分圧”

$$P_A\text{O}_2 = 150 - \frac{P_a\text{CO}_2}{0.8} \leftarrow \text{“肺胞の中にどれだけ酸素があるか”}$$

<呼吸のメカニズム：大まかに3つの役割>

～呼吸不全の原因は肺だけではない～

- ① 呼吸を調節する部分
；(例) 麻薬系鎮痛薬による呼吸抑制、脊髄損傷、ポリオ（脊髄の前角細胞の障害）
- ② 筋肉を動かす、または空気の通り道になる部分
；(例) ギラン・バレー症候群（末梢神経障害）、重症筋無力症（神経筋接合部の障害）、
筋ジストロフィー症（呼吸筋の病気）、後弯側弯（胸壁の病気）、ALS、肥満
- ③ ガス交換をする部分
；(例) 肺炎、肺塞栓

(注意) COPD は肺+呼吸筋疲労+呼吸中枢の反応低下

(呼吸における3つの役割)



☆ P_aCO_2 上昇（空気の出入り少ない。“肺胞低換気”）なら、肺以外が悪い（①か②）。

<A - aDO₂ (肺胞気-動脈血酸素分圧差) の考え方>

$$A - aDO_2 = P_A O_2 - PaO_2$$

(A=肺胞気、a=動脈血、D=Difference)

・基準値は 10mmHg 以下だが、
年齢と共に基準値も上がるので、A - aDO₂の基準値 ≦ 年齢(30 歳以上) × 0.3
“A - aDO₂の上昇 = 肺が悪い”

(ガス交換)

症例①

経口避妊薬を服用している 30 歳女性、朝から急に息苦しくなったので外来を受診。

室内気での SpO₂ は 90%。

血液ガスは以下の通りであった。血液ガスの解釈は？

pH 7.48, PaCO₂ 32mmHg, PaO₂ 80mmHg, HCO₃⁻ 24mEq/L

$$\begin{aligned} P_A O_2 &= (760 - 47) \times 0.21 - \frac{32}{0.8} \\ &= 150 - 40 \\ &= 110\text{mmHg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A - aDO_2 &= 110 - 80 \\ &= 30\text{mmHg} \end{aligned}$$

→その後、造影 CT で、肺塞栓と診断した。

< P_aCO_2 (換気の指標) と $A - aDO_2$ での鑑別 >

- ・ P_aCO_2 上昇 → 肺以外が悪い。
- ・ $A - aDO_2$ 上昇 → 肺が悪い (or 心臓内シャント)。

● “肺が悪い”ことによる低酸素血症の原因

= シャント、 \dot{V}/\dot{Q} ミスマッチ (換気血流比不均等)、拡散障害

(シャント) : 血液が肺胞から酸素を受け取らない → 低酸素血症 (酸素投与に反応しない)

(シャントの原因)

心臓 (右→左)	肺
<ul style="list-style-type: none"> ・ 卵円孔開存 (PFO) ・ 心房中隔欠損 (ASD) ・ 心室中隔欠損 (VSD) 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 動静脈奇形 (AVM) ・ ARDS ・ 肺水腫

☆ 酸素投与に反応が悪い低酸素血症ではシャントを考える!

< 血液ガスによる呼吸の評価 >

低酸素血症

P_aCO_2 上昇?

Yes

No

$A - aDO_2$ 上昇?

酸素投与に反応?

Yes/ No

Yes/ No

肺胞低換気+肺の問題/肺胞低換気 (肺以外) 肺の問題 (シャント以外) /シャント

症例②

30 歳代の女性、薬物大量服薬し救急搬送された。痛刺激に反応せず、顔には嘔吐の痕がある。室内気での SpO_2 は 83% で、酸素 5L/分 投与で 95% へ上昇した。室内気での血液ガスは以下の通り。低酸素血症の原因は？

pH 7.1, $PaCO_2$ 64mmHg, PaO_2 45mmHg, HCO_3^- 25mEq/L

(答え)

$$\begin{aligned} P_AO_2 &= (760 - 47) \times 0.21 - \frac{64}{0.8} \\ &= 150 - 80 \\ &= 70mmHg \end{aligned}$$

$$A - aDO_2 = 70 - 45 = 25mmHg$$

- ・ $PaCO_2$ が高いので、肺以外が悪い・・・薬物による呼吸中枢の抑制
 - ・ $A - aDO_2$ の差が大きいため、肺が悪い・・・嘔吐による誤嚥。
- 治療は、拮抗薬投与とか、人工呼吸器とか、透析とか。

<酸-塩基平衡について>

(酸-塩基平衡の化学式)

- ・酸である CO_2 は肺で、塩基（アルカリ）である HCO_3^- は腎臓で調整。

- ・酸-塩基平衡は CO_2 と HCO_3^- のバランス。

$PaCO_2$ が 40 (±5) mmHg, HCO_3^- 24 (±2) mEq/L の時にちょうどバランスが取れて pH が 7.4 (±0.05) になる。

●用語の説明

- ・アシデミア=血液が酸性に偏ること。要は pH が低いこと。
- ・アルカレミア=血液がアルカリに偏ること。要は pH が高いこと。

- ・アシドーシス=酸性に偏らせる原因。

(例) $PaCO_2$ が原因 ($PaCO_2$ の増加) なら呼吸性アシドーシス
 HCO_3^- が原因 (HCO_3^- の減少) なら代謝性アシドーシス。

- ・アルカローシス=アルカリに偏らせる原因。

(例) $PaCO_2$ が原因 ($PaCO_2$ の減少) なら呼吸性アルカローシス
 HCO_3^- が原因 (HCO_3^- の増加) なら代謝性アルカローシス。

●「代償」とは？

- ・pH をなるべく正常の 7.4 に近づけるためのシステム。
- ・pH は正常に近づくが、完全に正常化しない。
- ・肺は早く、腎臓は遅い。

(代償の目安)

- ・代謝性異常の場合

	HCO_3^-	$PaCO_2$
代謝性アシドーシス	↓ 1mEq/L	↓ 1.2mmHg
代謝性アルカローシス	↑ 1mEq/L	↑ 0.7mmHg

- ・呼吸性異常の場合

		$PaCO_2$	HCO_3^-
呼吸性 アシドーシス	急性	↑ 10mmHg	↑ 1mEq/L
	慢性	↑ 10mmHg	↑ 3.5mEq/L 以上
呼吸性 アルカローシス	急性	↓ 10mmHg	↓ 2mEq/L
	慢性	↓ 10mmHg	↓ 4mEq/L 以上

☆正しい代償から外れていたら、他の酸-塩基平衡を考える☆

症例③

急性の呼吸筋障害の患者さんが運ばれてきた。

呼吸回数 30 回/分、室内気での SpO_2 は 70%。血液ガスは以下の通りであった。

血液ガスの解釈とその原因は？

pH 7.0, $PaCO_2$ 80mmHg, PaO_2 50mmHg, HCO_3^- 28mEq/L

- ① アシデミア
- ② 呼吸性アシドーシス
- ③ 予想される代償

$$(80 - 40) \times \frac{1}{10} = 4$$

予想される HCO_3^- の値

$$24 + 4 = 28$$

適切な代償

		$PaCO_2$	HCO_3^-
呼吸性 アシドーシス	急性	↑ 10mmHg	↑ 1mEq/L
	慢性	↑ 10mmHg	↑ 3.5mEq/L 以上
呼吸性 アルカローシス	急性	↓ 10mmHg	↓ 2mEq/L
	慢性	↓ 10mmHg	↓ 4mEq/L 以上

→呼吸筋力低下による肺胞低換気による急性呼吸性アシドーシス

症例④

20 歳女性、1 時間前からの息苦しさを救急外来を受診。手足のしびれを訴え大声で泣いている。

電解質と血液ガスは以下の通りであった。血液ガスの解釈とその原因は？

pH 7.50, $PaCO_2$ 20mmHg, PaO_2 110mmHg, HCO_3^- 22mEq/L

- ① アルカレミア
- ② 呼吸性アルカローシス
- ③ 予想される代償

$$(40 - 20) \times \frac{2}{10} = 4$$

予想される HCO_3^- の値

$$24 - 4 = 20$$

適切な代償

→過換気による急性呼吸性アルカローシス

症例⑤

35 歳男性、1 日前からの嘔吐を主訴に来院。全身倦怠感が強く、身体所見では粘膜が乾燥している。心拍数 110 回/分、血圧 92/48mmHg。

電解質と血液ガスは以下の通りであった。血液ガスの解釈とその原因は？

pH 7.50, PaCO₂ 50mmHg, PaO₂ 80mmHg, HCO₃⁻ 40mEq/L

- ① アルカレミア
- ② 代謝性アルカローシス
- ③ 予想される代償

$$(40 - 24) \times 0.7 = 11.2$$

予想される PaCO₂ の値

$$40 + 11.2 = 51.2$$

適切な代償

	HCO ₃ ⁻	PaCO ₂
代謝性アシドーシス	↓ 1mEq/L	↓ 1.2mmHg
代謝性アルカローシス	↑ 1mEq/L	↑ 0.7mmHg

【代謝性アルカローシスの原因】

- ・嘔吐 (or NG チューブ)
- ・利尿薬 (ループやチアジド系)
- ・高二酸化炭素血症の急な補正
(COPD で CO₂ が溜まっている人の PaCO₂ を人工呼吸器でいきなり下げたときなど)
- ・クロライド不応性 (5%) = 生理食塩水を輸液しても治らない、ということ。
(例) 原発性アルドステロン症、Barter 症候群

●酸-塩基平衡の読み方

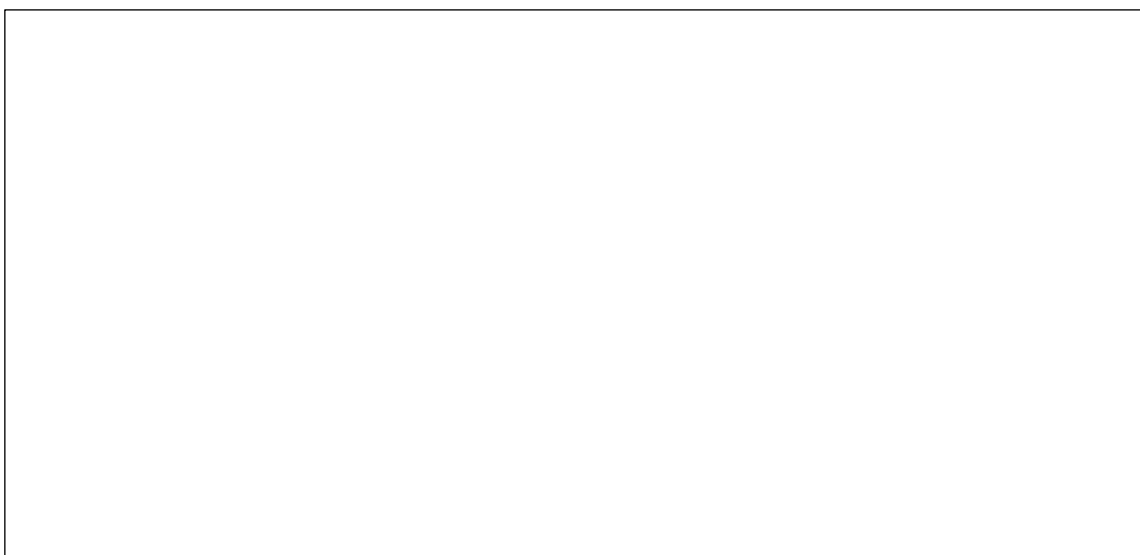
- ① アシデミアかアルカレミアか?・・・pH
- ② 呼吸性か代謝性か?・・・ $PaCO_2$ と HCO_3^-
- ③ 代償は適切か?・・・代償の計算
- ④ 代償が適切でなければ、他の異常は?
- ⑤ アニオンギャップ (anion gap:AG) を計算。AG>12 であれば、補正 HCO_3^- を計算
☆AG の正常値：12±2

●AG=陽イオンと陰イオンの差。

アルブミン(Alb)などのタンパクやケトンなどが含まれる。

“測定できない陰イオンの集合”のこと。

「AG が増加していると、必ず代謝性アシドーシスが存在する」



→低 Alb 血症の人はそれだけで AG が下がる。

→Alb は 4g/dL を基準値と考える。

そこから 1g/dL 低下するごとに AG は 2.5mEq/L 下がる。

よって、Alb が 4 を下回る時は、以下の式で補正する。

$$\text{補正AG} = \text{AG} + 2.5 \times (4 - \text{血清 Alb})$$

(例) Na^+ 136mEq/L, Cl^- 100mEq/L, HCO_3^- 24mEq/L, Alb 2g/dL

→AG=136-(100+24)=12 と一見正常だが、低 Alb があるので、

$$\text{補正AG} = 12 + 2.5 \times (4 - 2) = 17\text{mEq/L} >> 12$$

となり、AG 増加 (=代謝性アシドーシスある) している!

●AG による代謝性アシドーシスの鑑別。

- ①AG 正常・・・下痢、尿細管性アシドーシス (RTA)、回腸導管、
生理食塩水の大量輸液、アセタゾラミド (尿細管での HCO_3^- 再吸収を阻害)

・ HCO_3^- が減った分、 Cl^- が増えている関係

- ② AG 増加・・・乳酸アシドーシス、ケトアシドーシス (DKA、アルコール性、飢餓性)、
腎不全、中毒 (サリチル酸 (アスピリン)、エチレングルコール、メタノール)

・ HCO_3^- が減った分、AG が増加する関係。

<代謝性アシドーシスの比較>

- ③ AG 低下・・・低 Alb 血症 (測定されない陰イオンの減少)、陽イオン (多発性骨髄腫 (IgG 型)、リチウム中毒) の増加、臭化物中毒、検査エラー

症例⑥

20歳女性、下痢を主訴に救急外来を受診。強い嘔気もあるため、ここ数日間は経口摂取がほとんどできていない。

電解質と血液ガスは以下の通りであった。血液ガスの解釈とその原因は？

Na^+ 135mEq/L, Cl^- 104mEq/L

pH 7.32, $PaCO_2$ 35mmHg, PaO_2 96mmHg, HCO_3^- 19mEq/L

- ① アシデミア
- ② 代謝性アシドーシス
- ③ 予想される代償

$$(24 - 19) \times 1.2 = 6$$

予想される $PaCO_2$ の値

$$40 - 6 = 34 \quad \text{適切な代償}$$

	HCO_3^-	$PaCO_2$
代謝性アシドーシス	↓ 1mEq/L	↓ 1.2mmHg
代謝性アルカローシス	↑ 1mEq/L	↑ 0.7mmHg

- ④ 他の代謝異常はなし
- ⑤ $AG=135-(104+19)=12mEq/L$ であり、AG は正常。
→下痢による AG 正常代謝性アシドーシス

症例⑦

糖尿病の既往のある 40歳女性、20代からインスリンを使用している。発熱で救急外来を受診。検査で、尿路感染症と診断した。電解質と血液ガスは以下の通りであった。血液ガスの解釈とその原因は？ Na^+ 135mEq/L, Cl^- 99mEq/L

pH 7.23, $PaCO_2$ 25mmHg, PaO_2 112mmHg, HCO_3^- 12mEq/L Alb 4.2g/dL

- ① アシデミア
- ② 代謝性アシドーシス
- ③ 予想される代償

$$(24 - 12) \times 1.2 = 14.4$$

予想される $PaCO_2$ の値

$$40 - 14.4 = 25.6$$

適切な代償

- ④ なし
- ⑤ $AG=135-(99+12)=24mEq/L$ と 12 より大きい
→尿路感染症を契機とした DKA による AG 増加代謝性アシドーシス

症例⑧

アスピリン大量服薬のために救急搬送された男性。

呼吸数は 30 回/分。

電解質と血液ガスは以下の通りであった。血液ガスの解釈とその原因は？

Na^+ 138mEq/L, Cl^- 100mEq/L

pH 7.45, $PaCO_2$ 25mmHg, PaO_2 97mmHg, HCO_3^- 17mEq/L

- ① アルカレミア
- ② 呼吸性アルカローシス
- ③ 予想される代償

$$(40 - 25) \times \frac{2}{10} = 3$$

予想される HCO_3^- の値

$$24 - 3 = 21 \gg 17$$

不適切な代償（予想した HCO_3^- は 21 だが、実際の HCO_3^- は 17 となっている。つまり、他に HCO_3^- を下げる原因がある → HCO_3^- を下げるのは代謝性アシドーシス！）

		$PaCO_2$	HCO_3^-
呼吸性 アシドーシス	急性	↑ 10mmHg	↑ 1mEq/L
	慢性	↑ 10mmHg	↑ 3.5mEq/L 以上
呼吸性 アルカローシス	急性	↓ 10mmHg	↓ 2mEq/L
	慢性	↓ 10mmHg	↓ 4mEq/L 以上

- ④ 代謝性アシドーシスの併存
- ⑤ $AG = 138 - (100 + 17) = 21mEq/L \gg 12$

→アスピリン中毒による呼吸性アルカローシス+AG 増加代謝性アシドーシス

☆アスピリン中毒やグラム陰性桿菌による敗血症では、例外的に代償性の呼吸性アルカローシスが代謝性アシドーシスを上回ることがある！

症例⑨

腎不全のある 50 歳男性、悪心・嘔吐と全身倦怠感にて救急室を受診。救急室での電解質と血液ガスは以下の通りであった。血液ガスの解釈とその原因は？

Na^+ 149mEq/L, K^+ 6.0mEq/L, Cl^- 100mEq/L, BUN 120mg/dL, Cr 9.0g/dL

pH 7.40, $PaCO_2$ 38mmHg, PaO_2 72mmHg, HCO_3^- 24mEq/L

① 正常 ② $PaCO_2$ 、 HCO_3^- とも正常 ③?? ④正常??

⑤ $AG = 149 - (100 + 24) = 25 \gg 12$

→よって、代謝性アシドーシスがある！ “AG 増加あれば、代謝性アシドーシスある”

・ $\Delta AG = AG - \text{正常 } AG$

「AG が増えた分 (ΔAG) = HCO_3^- が減った分」

ΔAG (AG が増えている分) = $25 - 12 = 13\text{mEq/L}$

AG 増加代謝性アシドーシス = HCO_3^- が減った分、AG が増加する関係。

・ AG 増加代謝性アシドーシスが治ったら、 ΔAG の 13mEq/L は HCO_3^- に戻るはず、
が補正 HCO_3^- の考え方。

・ 補正 $HCO_3^- = AG$ 増加代謝性アシドーシスが治ったら、 HCO_3^- はどうなるのか、を示すもの。「補正 $HCO_3^- = HCO_3^- + \Delta AG$ 」

→AG 増加代謝性アシドーシスだけしか酸-塩基平衡異常がなければ、AG 増加代謝性アシドーシスが治ったら補正 HCO_3^- は正常の 24 mEq/L くらいになっている。24 mEq/L 近くになっていなければ、AG 増加代謝性アシドーシス以外に HCO_3^- を下げたり（代謝性アシドーシス）上げたり（代謝性アルカローシス）する原因がある。

→補正 $HCO_3^- = 24 + 13 = 37$ と 24 よりかなり高くなっている！

つまり、 HCO_3^- を上げる他の原因、つまり、代謝性アルカローシスがある。

よって、腎不全と嘔吐による AG 増加代謝性アシドーシス + 代謝性アルカローシス。

<まとめ>

- $AG = [Na^+] - ([Cl^-] + [HCO_3^-])$
- 補正AG = $AG + 2.5 \times (4 - \text{血清 Alb})$ ← Alb ≤ 4 の時
- $\Delta AG = AG - \text{正常 AG}$
- 補正 $HCO_3^- = HCO_3^- + \Delta AG$ ← 正常値 = 24。

症例⑩

膵炎の既往のある 40 歳男性、上腹部痛と悪心・嘔吐のために救急室を受診。

電解質と血液ガスは以下の通りであった。血液ガスの解釈とその原因は？

Na^+ 133mEq/L, K^+ 2.5mEq/L, Cl^- 84mEq/L, BUN 50mg/dL, Cr 3.5mg/dL
 pH 7.45, $PaCO_2$ 16mmHg, PaO_2 90mmHg, HCO_3^- 15mEq/L,
 乳酸 6mmol/L (基準値<2mmol/L)

- ① アルカレミア
- ② 呼吸性アルカローシス
- ③ 予想される代償

$$(40 - 16) \times \frac{2}{10} = 4.8$$

予想される HCO_3^- の値

$$24 - 4.8 = 19.2 \gg 15$$

不適切な代償

		$PaCO_2$	HCO_3^-
呼吸性 アシドーシス	急性	↑10mmHg	↑1mEq/L
	慢性	↑10mmHg	↑3.5mEq/L 以上
呼吸性 アルカローシス	急性	↓10mmHg	↓2mEq/L
	慢性	↓10mmHg	↓4mEq/L 以上

- ④ 代謝性アシドーシスの併存
- ⑤ $AG=133-(84+15)=34mEq/L \gg 12$
- ⑥ $\Delta AG = 34-12=22$

補正 $HCO_3^- = 15 + 22 = 37 \gg 24$ よって、代謝性アルカローシスの併存
 ・呼吸は

$$\begin{aligned}
 P_AO_2 &= (760 - 47) \times 0.21 - \frac{16}{0.8} \\
 &= 150 - 20 \\
 &= 130mmHg \\
 A - aDO_2 &= 130 - 90 \\
 &= 40mmHg
 \end{aligned}$$

と $A - aDO_2$ の差が大きい。よって肺の疾患がある。

→疼痛による過換気+乳酸アシドーシス (腎不全やアルコール性ケトアシドーシスなど)
 +嘔吐+肺が悪い (誤嚥など)

:呼吸性アルカローシス+A G 増加代謝性アシドーシス

+代謝性アルカローシス+A-aDO₂上昇

<参考文献>

- ・ 竜馬先生の血液ガス白熱講義 150 分：中外医学社
- ・ 帰ってきた竜馬先生の血液ガス白熱講義：中外医学社
 - ← 竜馬先生の本は大変わかりやすいです！是非購入し、手元に置いてください！
- ・ 当直医マニュアル：医歯薬出版株式会社
 - ← コンパクトに知識がまとめてあります。
- ・ 稲盛和夫の実学-経営と会計-：日本経済新聞出版
 - ← 京セラと KDDI の創業者。経営の神様、稲盛和夫さんの本
 - 経営のみならず日々の生活の中に取り入れやすい稲盛哲学は非常に分かりやすいです。
 - 稲盛和夫さんの本もしくは CD もしくは youtube を是非読み聞いてみてください！
- ・ 知の編集術：講談社現代新書
 - ← すごい本を数多く書かれている松岡正剛さんの本。
 - 講義資料を作るのはまさに先人達の知の編集だと思います。

2020.12.27