

2012年4月26日

第9回 Niigata Youth Assembly for Nephrology (NYAN)

酸塩基平衡を熱く語ろう

新潟臨港病院 内科・腎臓内科

渡辺 博文

はじめに・・・

救急外来にこんな人がやってきました。

50歳代 男性 意識障害

体温 36.5℃、脈拍110/分、血圧100/60mmHg、

呼吸数22回/分、SpO₂ 99%(room air)、JCS 100。



どうしよう？

動脈血ガス

pH : 7.42

PCO₂ : 18mmHg

HCO₃⁻ : 10mEq/L

Na : 150mEq/L

K : 3.6mEq/L

Cl : 110mEq/L

酸塩基平衡って何？

ブレンステッド・ローリーの定義

- 酸⇒ H^+ を与える物質
- 塩基⇒ H^+ を受け取る物質

酸

炭酸 (CO_2)

硫酸 (H_2SO_4)

リン酸 ($H_2PO_4^-$)



塩基

重炭酸イオン
(HCO_3^-)

蛋白質

ヘモグロビン



酸塩基平衡って何？

$$\text{pH} = -\log[\text{H}^+]$$

⇒ H^+ の濃度が10のマイナス何乗か



25°Cの純水では、

$$[\text{H}^+] = [\text{OH}^-] = 1.00 \times 10^{-7} \text{mol/L}$$

⇒ 中性はpH 7

中性: $[\text{H}^+] = 0.0000001 \text{mmol/L (mEq/L)}$

なぜpHを一定にしなければならない？

- 細胞外液のpHは7.40 ($[H^+]=40\text{nmol/L}$)
($[H^+]=0.000004\text{mmol/L}$)

～体細胞の生命活動が正常に営まれるために～

たとえば・・・

pHが変わる



アミノ酸の帯電状況が変わる



蛋白質の三次元構造が変わる



受容体、ホルモンなどがうまく働かなくなる

体の中で酸が作られていく！

1日に体の中で作られる酸は

15000～20000mEq

二酸化炭素(CO_2) \Rightarrow 揮発性酸

硫酸 (H_2SO_4)

リン酸 (H_2PO_4^-)

ケト酸、乳酸 など

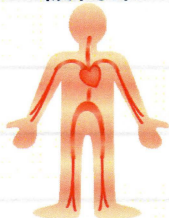
} \Rightarrow 不揮発性酸 (50 ~ 100mEq)

このままでは体に酸がたまりすぎて大変！

\Rightarrow 体の中で酸塩基平衡を調整している！

pHを調節する仕組み

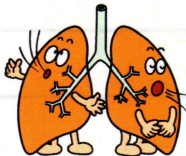
緩衝系



酸の放出・吸収

ミリ秒

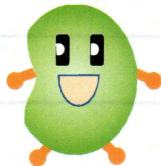
肺



揮発性酸の排泄

秒～分

腎臓



塩基の再吸収
不揮発性酸の排泄

時間～日

緩衝系

酸や塩基が加わった時に衝撃を和らげる

重炭酸系



蛋白系



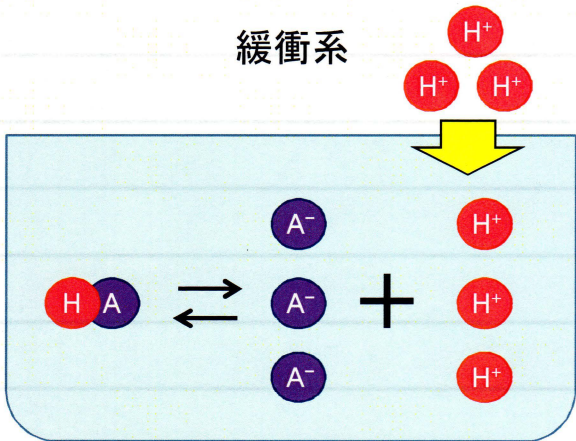
リン酸系



ヘモグロビン系

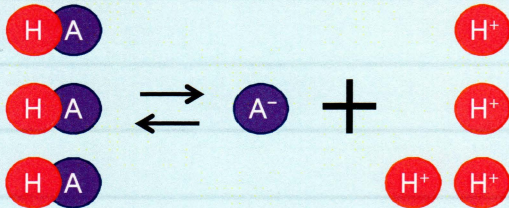


緩衝系



緩衝系

酸や塩基が加わった時に衝撃を和らげる



肺での調節

CO₂の排泄

情報
刺激



呼吸ドライブ
(末梢性・中枢性化学受容器)



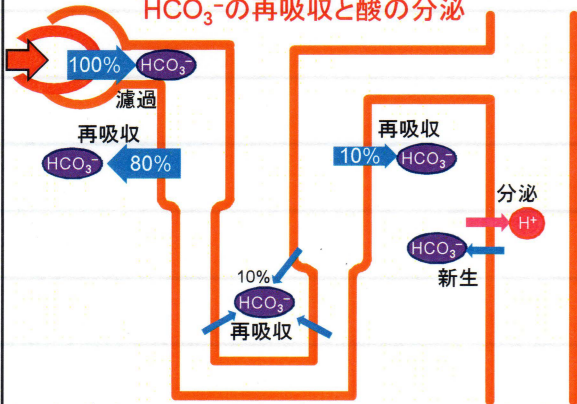
呼吸神経筋系
(脊髓・末梢神経、呼吸筋)



換気装置
(胸郭、気道・肺)

腎臓での調節

HCO_3^- の再吸収と酸の分泌



Henderson-Hasselbalchの式

$$\begin{aligned}\text{pH} &= \text{pK} + \log \frac{[\text{A}^-]}{[\text{HA}]} = 6.1 + \log \frac{[\text{HCO}_3^-]}{[\text{H}_2\text{CO}_3]} \\ &= 6.1 + \log \frac{[\text{HCO}_3^-]}{0.03 \times \text{PCO}_2}\end{aligned}$$

～重炭酸緩衝系と肺と腎臓の関係を表す～

$$\text{pH} = 6.1 + \log \frac{[\text{HCO}_3^-]}{0.03 \times \text{PCO}_2} = \text{pK}_1 + \log \frac{[\text{A}_1^-]}{[\text{HA}_1]} = \text{pK}_2 + \log \frac{[\text{A}_2^-]}{[\text{HA}_2]}$$

1つの緩衝系が変化すると、pHの変化を通して
他の緩衝系も同じような変化をする

⇒酸塩基平衡では、pH、PCO₂、HCO₃⁻を考えればよい

酸塩基平衡関連で覚えておくこと

- Na^+ : 140(± 5) mEq/L
- K^+ : 4.0(± 0.5) mEq/L
- Cl^- : 100(± 5) mEq/L
- pH : 7.40 (7.38~7.41)
- PaCO_2 : 40 mmHg (39~43mmHg) \Rightarrow 呼吸性の要因
- HCO_3^- : 24 mEq/L (24~26mEq/L) \Rightarrow 代謝性の要因
- アニオンギャップ: $\text{Na} - (\text{Cl} + \text{HCO}_3^-) = 12 \pm 2$
- アシデミア: pH 7.35よりも酸性の状態
- アルカレミア: pH 7.45よりも塩基性の状態
- アシドーシス: pHを下げる異常なプロセスのある状態
- アルカローシス: pHを上げる異常なプロセスのある状態

動脈血ガスの読み方

- ① pHから、アシデミアかアルカレミアか？
- ② 代謝性か？呼吸性か？
- ③ アニオンギャップ(AG)は？
- ④ 代償性変化が一次性の異常に対して予測の範囲内か？
- ⑤ AGが上昇している場合、補正 HCO_3^- は？
- ⑥ 疾患は？

酸塩基平衡に対する生理的代償性変化

一次性病態	代償性変化の範囲	代償の限界値
呼吸性アシドーシス	【急性変化】 $\Delta[\text{HCO}_3^-] = 0.1 \times \Delta\text{PCO}_2$	$[\text{HCO}_3^-] = 30\text{mEq/L}$
	【慢性変化】 $\Delta[\text{HCO}_3^-] = 0.35 \times \Delta\text{PCO}_2$	$[\text{HCO}_3^-] = 42\text{mEq/L}$
呼吸性アルカローシス	【急性変化】 $\Delta[\text{HCO}_3^-] = 0.2 \times \Delta\text{PCO}_2$	$[\text{HCO}_3^-] = 18\text{mEq/L}$
	【慢性変化】 $\Delta[\text{HCO}_3^-] = 0.5 \times \Delta\text{PCO}_2$	$[\text{HCO}_3^-] = 12\text{mEq/L}$
代謝性アシドーシス	$\Delta\text{PCO}_2 = (1\sim1.3) \times \Delta\text{HCO}_3^-$	$\text{PCO}_2 = 15\text{mmHg}$
代謝性アルカローシス	$\Delta\text{PCO}_2 = (0.5\sim1.0) \times \Delta\text{HCO}_3^-$	$\text{PCO}_2 = 60\text{mmHg}$

※代謝性の場合のみ： $\text{PCO}_2 (\text{mmHg}) = \text{HCO}_3^-(\text{mEq/L}) + 15$ (マジックナンバー15)

例題 ～酸塩基平衡を読む～

pH : 7.25、 PCO_2 : 60mmHg、 HCO_3^- : 26mmol/L
Na : 140mEq/L、K : 4.7mEq/L、Cl : 102mEq/L

- ① pHから、アシデミアかアルカレミアか？
- ② 代謝性か？呼吸性か？
- ③ アニオンギャップ(AG)は？
- ④ 代償性変化が一次性の異常に対して予測の範囲内か？
- ⑥ 疾患は？

例題 ～酸塩基平衡を読む～

pH : 7.25、 PCO_2 : 60mmHg、 HCO_3^- : 26mmol/L
Na : 140mEq/L、K : 4.7mEq/L、Cl : 102mEq/L

① pHから、アシデミアかアルカレミアか？

⇒ pH 7.25 から、アシデミア

② 代謝性か？呼吸性か？

⇒ PCO_2 上昇、 HCO_3^- 上昇だから、呼吸性アシドーシス

③ アニオンギャップ(AG)は？

⇒ $\text{AG} = \text{Na} - (\text{Cl} + \text{HCO}_3^-) = 140 - (102 + 26) = 12$ (正常)

④ 代償性変化が一次性の異常に対して予測の範囲内か？

⇒ 急性とすると、 $\Delta[\text{HCO}_3^-] = 0.1 \times \Delta\text{PCO}_2 = 0.1 \times (60 - 40) = 2$ (一致)
慢性とすると、 $\Delta[\text{HCO}_3^-] = 0.35 \times \Delta\text{PCO}_2 = 0.35 \times (60 - 40) = 7$

⑥ 疾患は？

⇒ 呼吸性アシドーシス + 代謝性代償(急性変化) ⇒ 呼吸系の障害

呼吸性アシドーシス

～肺胞低換気で PaCO_2 が上昇する～

中枢性

薬物
脳卒中
感染

実質

肺気腫
塵肺症
気管支炎
急性呼吸促迫症候群
圧外傷

神経筋

ポリオ
脊柱後側弯症
筋無力症
筋ジストロフィ

気道

閉塞
喘息

その他

肥満
低換気
高二酸化炭素許容人工換気

呼吸性アルカローシス

～肺胞過換気で PaCO_2 が低下する～

中枢神経系の刺激

疼痛
不安、精神病
発熱
脳血管障害
髄膜炎、脳炎
腫瘍、
外傷

薬物またはホルモン

妊娠、プロゲステロン
サリチル酸
心不全

胸部受容体の刺激

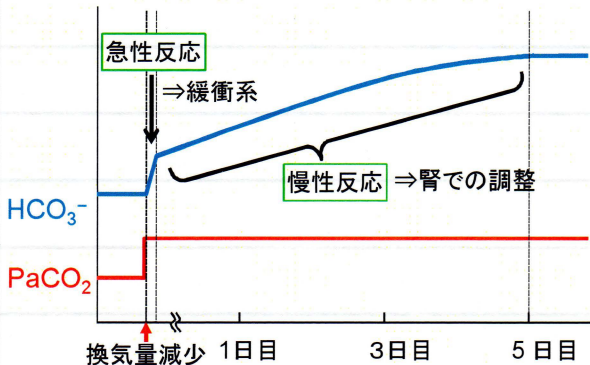
血胸
動揺胸郭
心不全
肺塞栓症

その他

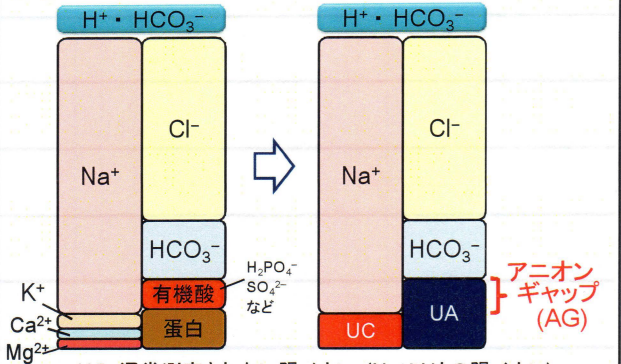
低酸素血症または組織低酸素
高地、 PaCO_2 低下
肺炎、肺水腫
誤嚥
高度の貧血

敗血症
肝不全
人工呼吸器による過換気
温熱への暴露
代謝性アシドーシスからの回復期

代謝性代償の急性・慢性反応



アニオンギャップ(AG)とは



UC: 通常測定されない陽イオン (Na^+ 以外の陽イオン)

UA: 通常測定されない陰イオン (Cl^- 、 HCO_3^- 以外の陰イオン)

高AG性代謝性アシドーシス

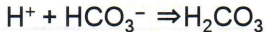
血中に酸(HA)が増える



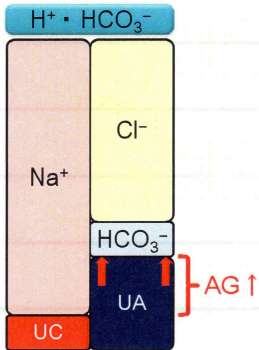
pHが下がる



緩衝作用が起こる



A⁻が増えてHCO₃⁻が減る



高AG性代謝性アシドーシス

～酸が増えて HCO_3^- が減る～

酸産生の増加

乳酸アシドーシス
ケトアシドーシス

腎排泄低下

腎不全

アルコール負荷

エタノール
メタノール
エチレングリコール

その他の物質負荷

サリチル酸
パラアルデヒド
イソニアジド

正常AG性(高Cl性)代謝性アシドーシス

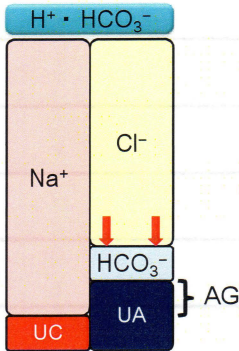
血中から HCO_3^- が失われる



陰イオンの不足を補うため
 Cl^- が補充される



AGは変わらずに Cl^- が増える



正常AG性(高Cl性)代謝性アシドーシス

～ HCO_3^- が減って Cl^- が増える～

腎からの HCO_3^- 喪失

尿細管性アシドーシス

炭酸脱水素酵素

低アルドステロン症

K保持性利尿薬

など

消化管からの HCO_3^- 喪失

下痢

尿管S状結腸吻合

陰イオン交換樹脂

CaCl_2 、 MgCl_2 投与

など

代謝性アルカローシス

～ HCO_3^- の蓄積または不揮発酸の喪失～

ふつうは、体の中で酸が作られ続ける

HCO_3^- が多くなっても腎で再吸収しなければ濃度は上がらない

代謝性アルカローシスの発生要因

胃からの H^+ 喪失、腎からの H^+ 喪失 など

+

代謝性アルカローシスの維持要因

循環血漿量の低下

(⇒近位尿細管の HCO_3^- 再吸収の閾値上昇)

低K血症 など

代謝性アルカローシス

～ HCO_3^- の蓄積または不揮発酸の喪失～

Cl反応性

(尿中Cl-濃度<10mEq/L)

腎性:

利尿薬投与後
高炭酸ガス血症後
非吸収性陰イオン

消化管性:

絨毛状腺腫
先天性Cl喪失性下痢症
嘔吐または胃液吸収

外因性アルカリ過剰:

重炭酸投与
ミルクアルカリ症候群
大量輸液

Cl抵抗性

(尿中Cl-濃度>20mEq/L)

高血圧あり:

原発性アルドステロン症
レニン産生腫瘍
先天性副腎過形成
Cushing症候群
腎動脈狭窄
Liddle症候群
甘草摂取

高血圧なし:

Barter症候群
Gitelman症候群
利尿薬投与中
高Ca血症
飢餓後
大量のK欠乏

補正HCO₃⁻とは

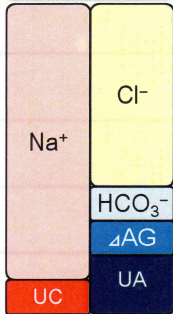
高AG性代謝性
アシドーシス

H⁺・HCO₃⁻

AG上昇を起こす病態が
なかった場合のHCO₃⁻

$$\text{補正HCO}_3^- = \text{実測HCO}_3^- + \Delta\text{AG}$$

($\Delta\text{AG} = \text{実測AG} - \text{正常AG}$)



補正HCO₃⁻ < 24mEq/L

↳ 正常AG性(高Cl⁻性)代謝性
アシドーシスの合併

補正HCO₃⁻ > 24mEq/L

↳ 代謝性アルカローシスの
合併

ベースエクセス(BE)とは

Base Excess: 塩基過剰

血液1Lを37.0°C、 PCO_2 40mmHg、完全酸素下で
滴定によってpH7.40に戻すのに必要な酸・塩基の量

塩基が多くて酸が必要な状態だとプラスになり、
塩基が少なくて塩基が必要な状態だとマイナスになる

逆に言えば、塩基の状態しかわからない・・・

体全体のバランスはよくわからない・・・

アシドーシスやアルカローシスの存在はわからない・・・

⇒順番に血液ガスを分析していけば、BEは必要ない

最初の症例 ～50歳代 男性 意識障害～

50歳くらいの男性 意識障害

体温 36.5℃、脈拍110/分、血圧100/60mmHg、
呼吸数22回/分、SpO₂ 99%(room air)、JCS 100。



動脈血ガス

pH : 7.42

PCO₂ : 18mmHg

HCO₃⁻ : 10mEq/L

Na : 150mEq/L

K : 3.6mEq/L

Cl : 110mEq/L

最初の症例 ～50歳代 男性 意識障害～

pH : 7.42、PCO₂ : 18mmHg、HCO₃⁻ : 10mEq/L

Na : 150mEq/L、K : 3.6mEq/L、Cl : 110mEq/L

① pHから、アシデミアかアルカレミアか？

② 代謝性か？呼吸性か？

最初の症例 ～50歳代 男性 意識障害～

pH : 7.42、 PCO_2 : 18mmHg、 HCO_3^- : 10mEq/L
Na : 150mEq/L、K : 3.6mEq/L、Cl : 110mEq/L

③ アニオンギャップ(AG)は？

④ 代償性変化が一次性の異常に対して予測の範囲内か？

⑤ AGが上昇している場合、補正 HCO_3^- は？

最初の症例 ～50歳代 男性 意識障害～

pH : 7.42、 PCO_2 : 18mmHg、 HCO_3^- : 10mEq/L

Na : 150mEq/L、K : 3.6mEq/L、Cl : 110mEq/L

⑥ 疾患は？

酸塩基平衡異常の治療

・大原則は、原疾患の治療！

酸塩基平衡異常		原因	治療イメージ
呼吸性 アシドーシス		低換気	換気量を上げる
呼吸性 アルカローシス		過換気	換気量を下げる
代謝性 アシドーシス	高AG性	不揮発性酸の蓄積	余分な酸を排泄させる
	正常AG性	HCO_3^- の喪失	失われた塩基を補充する
代謝性 アルカローシス	Cl反応性	酸の喪失と循環血漿量減少	循環血漿量を増やす
	Cl抵抗性	酸の喪失と低K血症など	HCO_3^- の排泄など