

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°C、脈拍110/分、血圧100/60mmHg、

呼吸数22回/分、SpO<sub>2</sub> 99%(room air)、JCS 100。



どうしよう？

## 動脈血ガス

pH : 7.42

PCO<sub>2</sub> : 18mmHg

HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> : 10mEq/L

Na : 150mEq/L

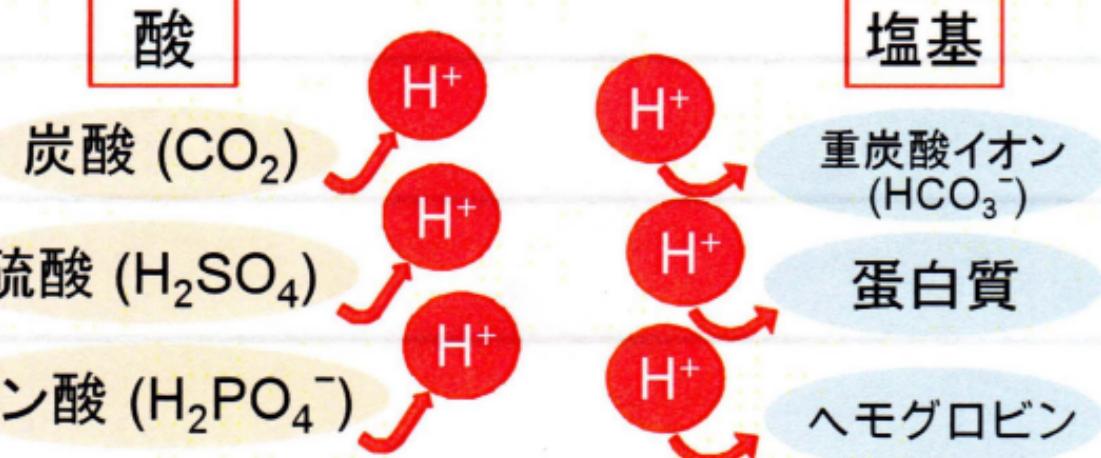
K : 3.6mEq/L

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 $\Rightarrow$ H<sup>+</sup>を与える物質
- 塩基 $\Rightarrow$ H<sup>+</sup>を受け取る物質



# 酸塩基平衡って何？

$$pH = -\log[H^+]$$

⇒  $H^+$ の濃度が10のマイナス何乗か



25°Cの純水では、

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

⇒ 中性は pH 7

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

# 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** ( $[H^+] = 40\text{nmol/L}$ )  
( $[H^+] = 0.000004\text{mmol/L}$ )

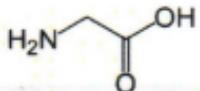
～体細胞の生命活動が正常に営まれるために～

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くなくなる

# 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( $\text{CO}_2$ )  $\Rightarrow$  挥発性酸

硫酸 ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ )

リン酸 ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ )

ケト酸、乳酸 など

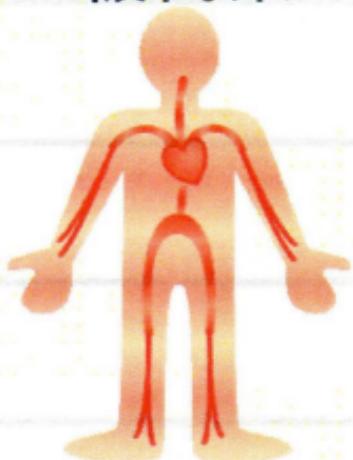
$\Rightarrow$  不揮発性酸 (50～100mEq)

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！

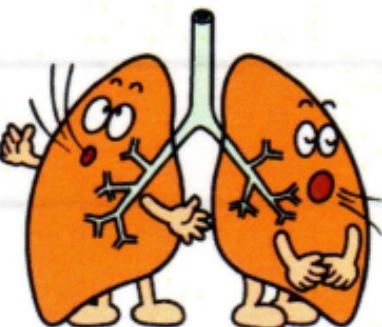
# pHを調節する仕組み

緩衝系



酸の放出・吸収

肺



揮発性酸の排泄

腎臓



塩基の再吸収  
不揮発性酸の排泄

ミリ秒

秒～分

時間～日

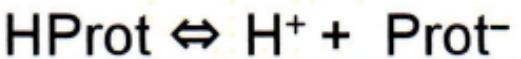
# 緩衝系

酸や塩基が加わった時に衝撃を和らげる

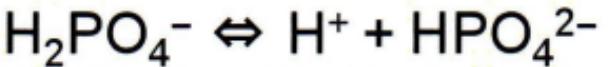
重炭酸系



蛋白系



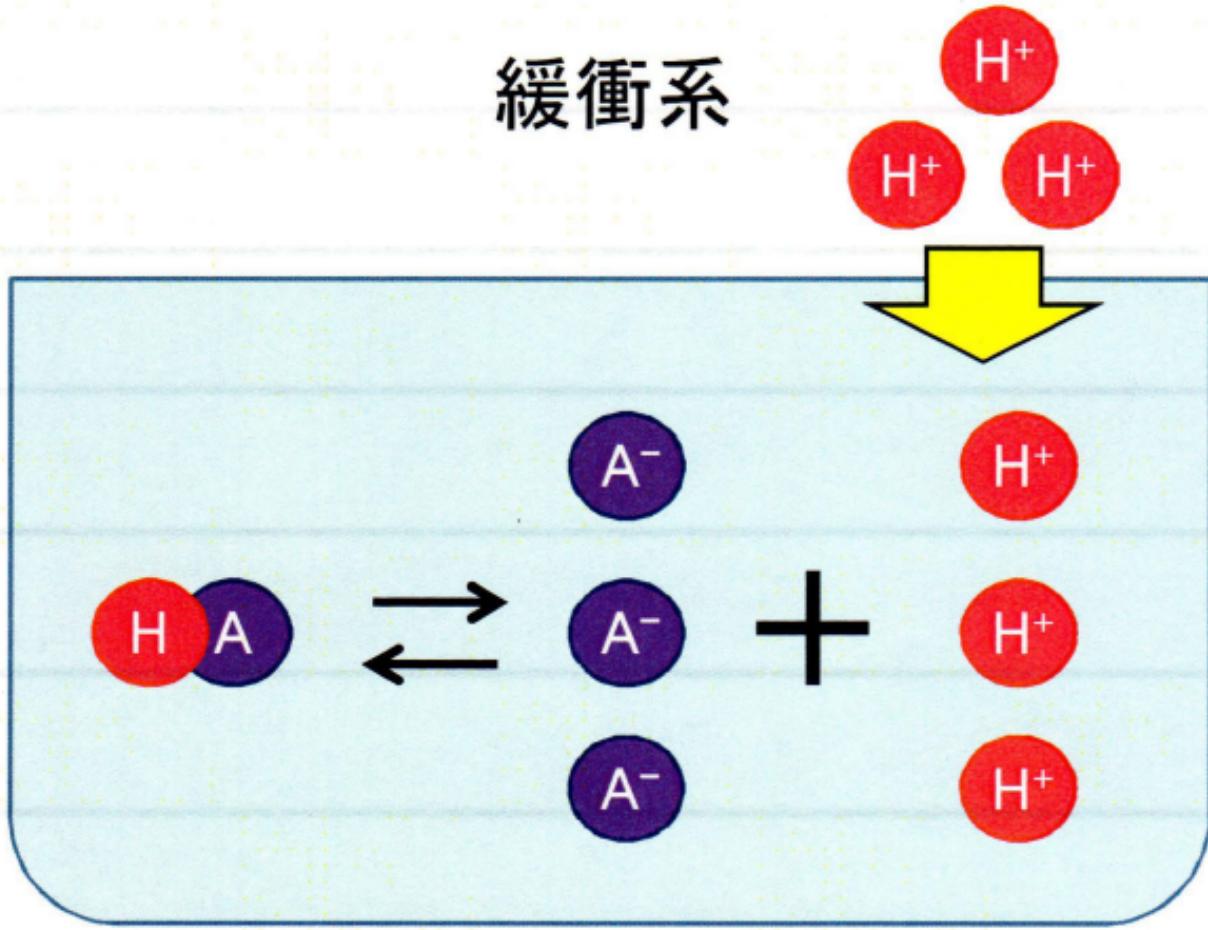
リン酸系



ヘモグロビン系

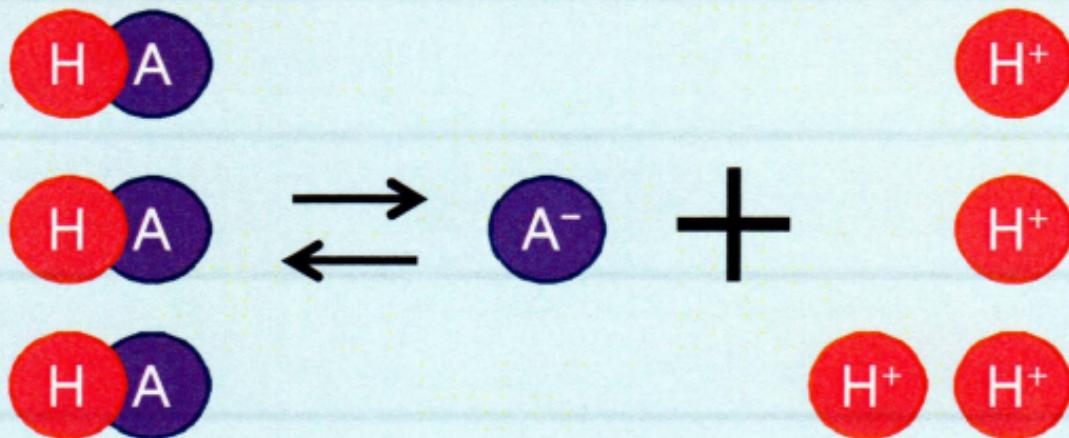


# 緩衝系



# 緩衝系

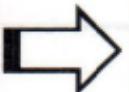
酸や塩基が加わった時に衝撃を和らげる



# 肺での調節

CO<sub>2</sub>の排泄

情報  
刺激



呼吸ドライブ  
(末梢性・中枢性化学受容器)



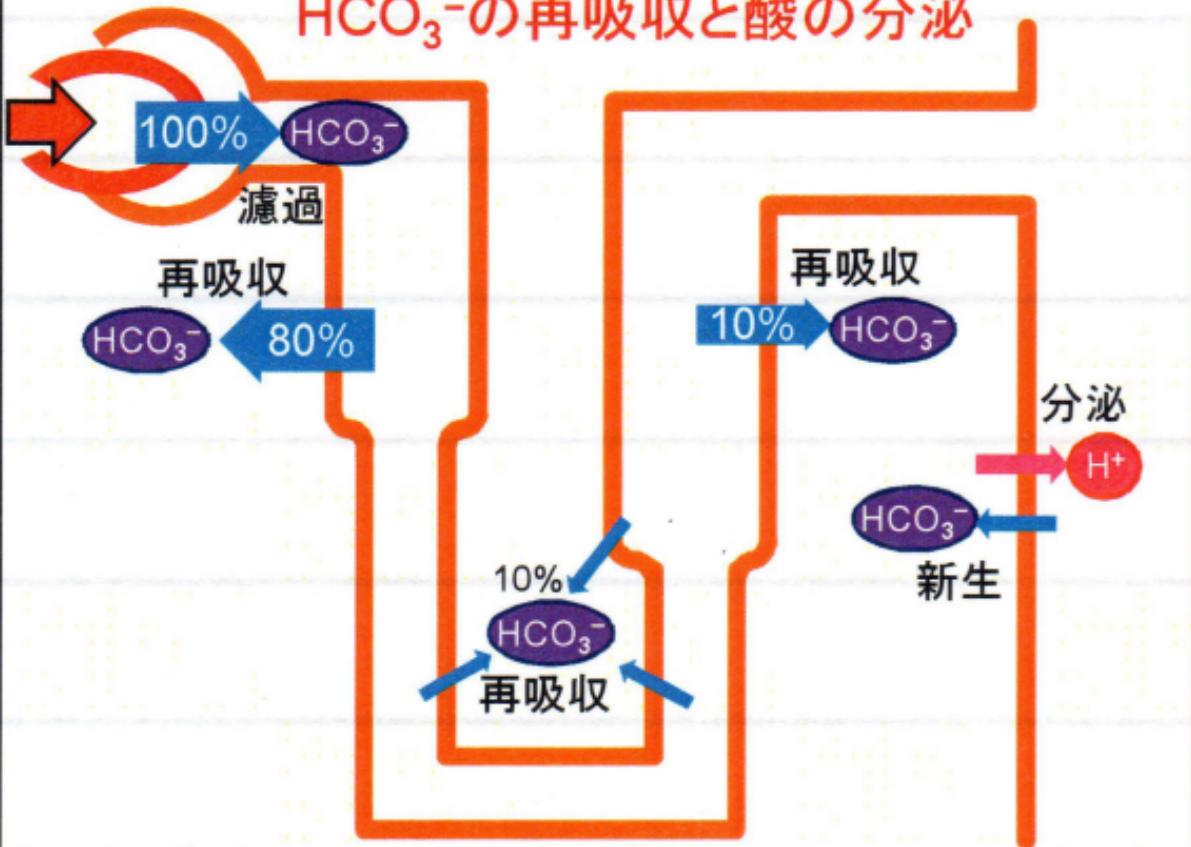
呼吸神経筋系  
(脊髄・末梢神経、呼吸筋)



換気装置  
(胸郭、気道・肺)

# 腎臓での調節

## HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>の再吸収と酸の分泌



# Henderson-Hasselbalchの式

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

～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、PCO<sub>2</sub>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>を考えればよい

# 酸塩基平衡関連で覚えておくこと

- $\text{Na}^+$  : 140( $\pm 5$ ) mEq/L
- $\text{K}^+$  : 4.0( $\pm 0.5$ ) mEq/L
- $\text{Cl}^-$  : 100( $\pm 5$ ) mEq/L
- pH : 7.40 (7.38~7.41)
- $\text{PaCO}_2$  : 40 mmHg (39~43mmHg) ⇒ 呼吸性の要因
- $\text{HCO}_3^-$  : 24 mEq/L (24~26mEq/L) ⇒ 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的異常に 対して  
予測の範囲内か？
- ⑤ AGが上昇している場合、補正 $\text{HCO}_3^-$ 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】 $\Delta[HCO_3^-] = 0.1 \times \Delta PCO_2$	$[HCO_3^-] = 30mEq/L$
	【慢性変化】 $\Delta[HCO_3^-] = 0.35 \times \Delta PCO_2$	$[HCO_3^-] = 42mEq/L$
呼吸性アルカローシス	【急性変化】 $\Delta[HCO_3^-] = 0.2 \times \Delta PCO_2$	$[HCO_3^-] = 18mEq/L$
	【慢性変化】 $\Delta[HCO_3^-] = 0.5 \times \Delta PCO_2$	$[HCO_3^-] = 12mEq/L$
代謝性アシドーシス	$\Delta PCO_2 = (1-1.3) \times \Delta HCO_3^-$	$PCO_2 = 15mmHg$
代謝性アルカローシス	$\Delta PCO_2 = (0.5-1.0) \times \Delta HCO_3^-$	$PCO_2 = 60mmHg$

※代謝性の場合のみ： $PCO_2 (mmHg) = HCO_3^-(mEq/L) + 15$  (マジックナンバー15)

# 例題～酸塩基平衡を読む～

pH : 7.25、 $\text{PCO}_2$  : 60mmHg、 $\text{HCO}_3^-$  : 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的異常に対して予測の範囲内か？
- ⑤ 病状は？
- ⑥ 疾患は？

# 例題～酸塩基平衡を読む～

pH : 7.25、PCO<sub>2</sub> : 60mmHg、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> : 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<sub>2</sub> 上昇、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 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？

⇒ AG = Na - (Cl + HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) = 140 - (102 + 26) = 12 (正常)

④ 代償性変化が一次性的異常に対して予測の範囲内か？

⇒ 急性とすると、 $\Delta[HCO_3^-] = 0.1 \times \Delta PCO_2 = 0.1 \times (60 - 40) = 2$  (一致)

慢性とすると、 $\Delta[HCO_3^-] = 0.35 \times \Delta PCO_2 = 0.35 \times (60 - 40) = 7$

⑤ 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<sub>2</sub>が上昇する～

中枢性

薬物

脳卒中

感染

気道

閉塞

喘息

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

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<sub>2</sub>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
- 動搖胸郭
- 心不全
- 肺塞栓症

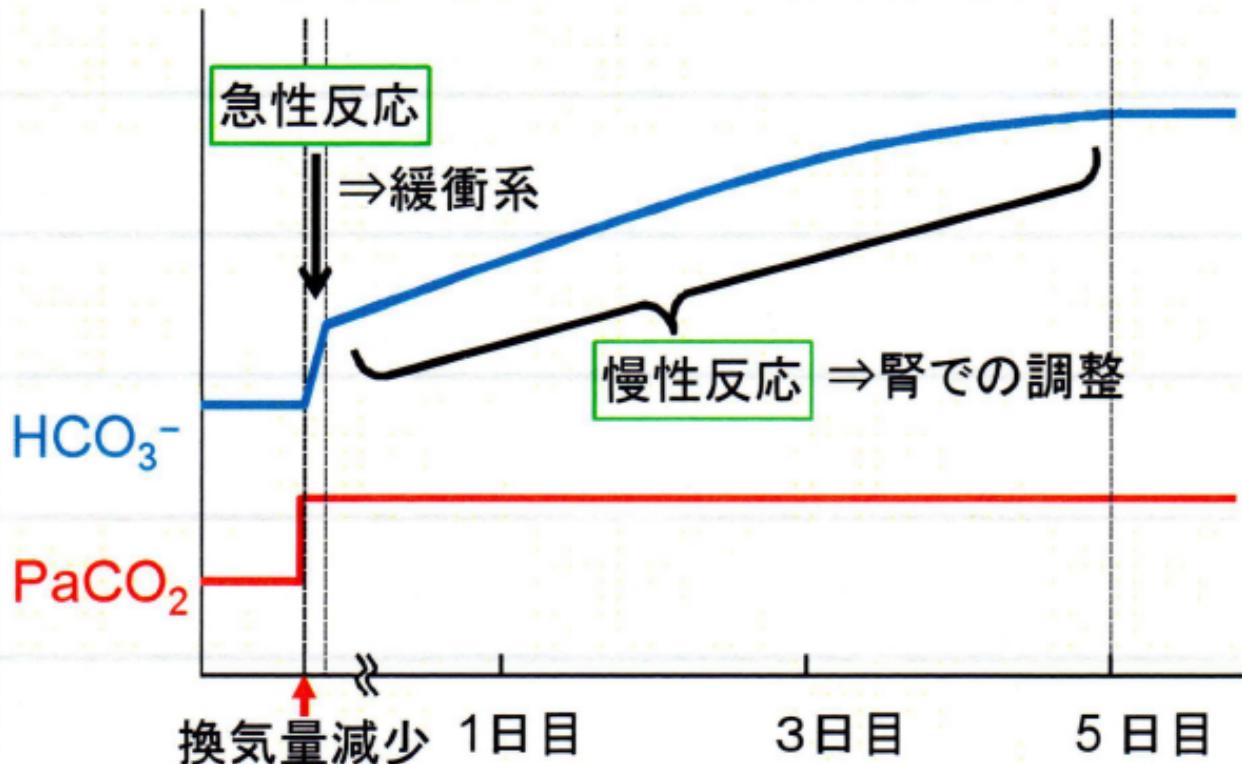
## 低酸素血症または組織低酸素

- 高地、PaCO<sub>2</sub>低下
- 肺炎、肺水腫
- 誤嚥
- 高度の貧血

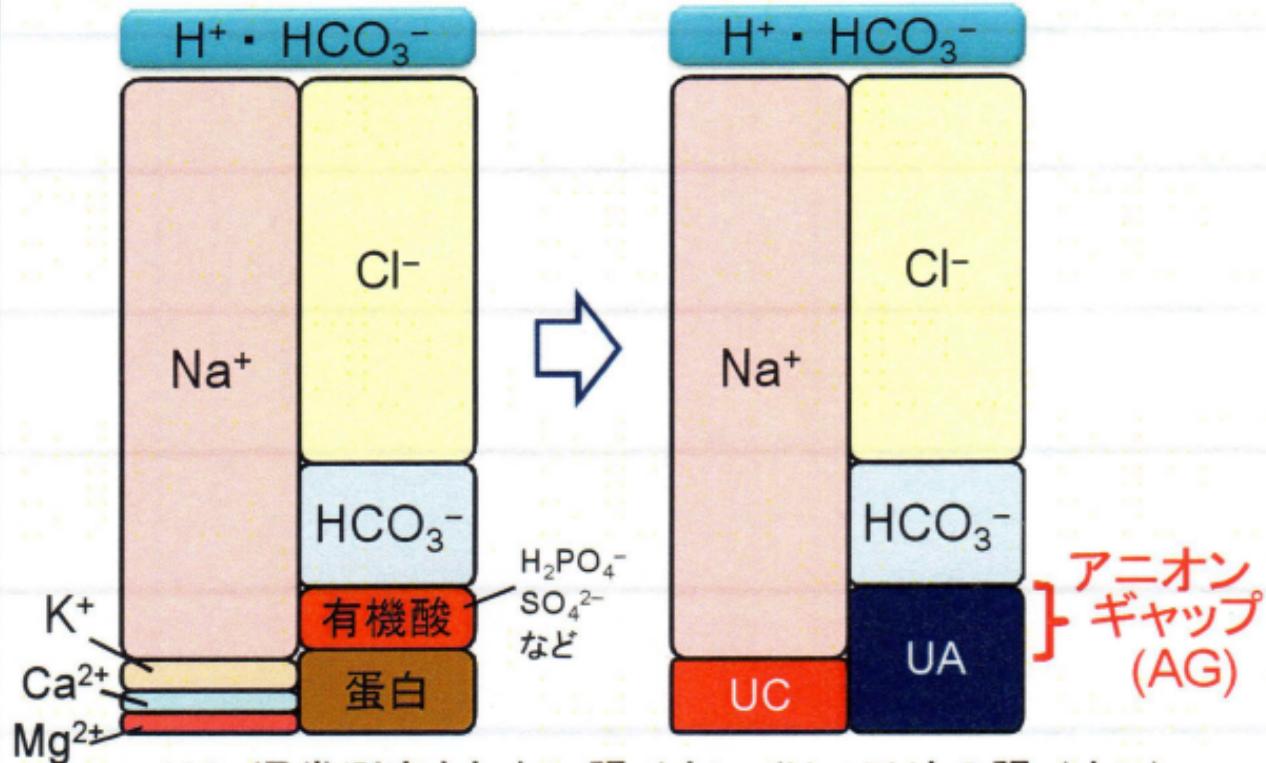
## その他

- 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 ( $\text{Na}^+$ 以外の陽イオン)

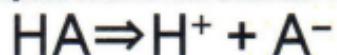
UA: 通常測定されない陰イオン ( $\text{Cl}^-$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 以外の陰イオン)

# 高AG性代謝性アシドーシス

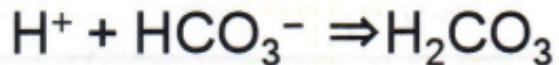
血中に酸(HA)が増える



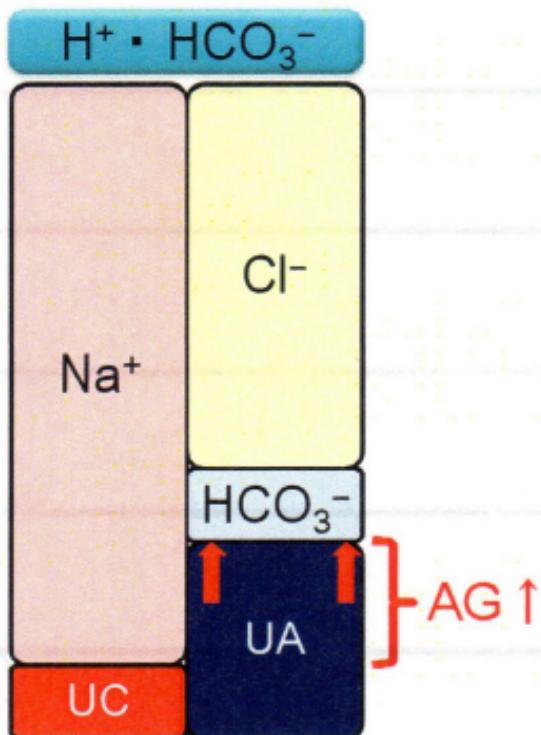
pHが下がる



緩衝作用が起こる



A<sup>-</sup>が増えてHCO<sub>3</sub><sup>-</sup>が減る



# 高AG性代謝性アシドーシス

～酸が増えて $\text{HCO}_3^-$ 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  
エチレンギリコール

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CI性)代謝性アシドーシス

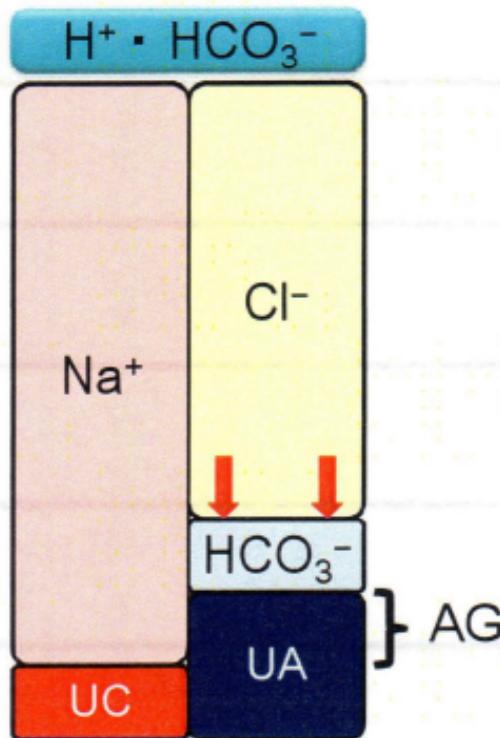
血中から $\text{HCO}_3^-$ が失われる



陰イオンの不足を補うため  
 $\text{Cl}^-$ が補充される



AGは変わらずに $\text{Cl}^-$ が増える



# 正常AG性(高Cl性)代謝性アシドーシス

～ $\text{HCO}_3^-$  が減って $\text{Cl}^-$ が増える～

腎からの $\text{HCO}_3^-$ 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 $\text{HCO}_3^-$ 喪失

下痢

尿管S状結腸吻合

陰イオン交換樹脂

$\text{CaCl}_2$ 、 $\text{MgCl}_2$ 投与

など

# 代謝性アルカローシス

～ $\text{HCO}_3^-$  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  
 $\text{HCO}_3^-$ 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 $\text{H}^+$ 喪失、腎からの $\text{H}^+$ 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 $\text{HCO}_3^-$ 再吸収の閾値上昇)

低K血症 など

# 代謝性アルカローシス

～ $\text{HCO}_3^-$  の蓄積または不揮発酸の喪失～

## Cl<sup>-</sup>反応性

(尿中Cl<sup>-</sup>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<sup>-</sup>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<sup>-</sup>抵抗性

(尿中Cl<sup>-</sup>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:

Bartter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HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>とは

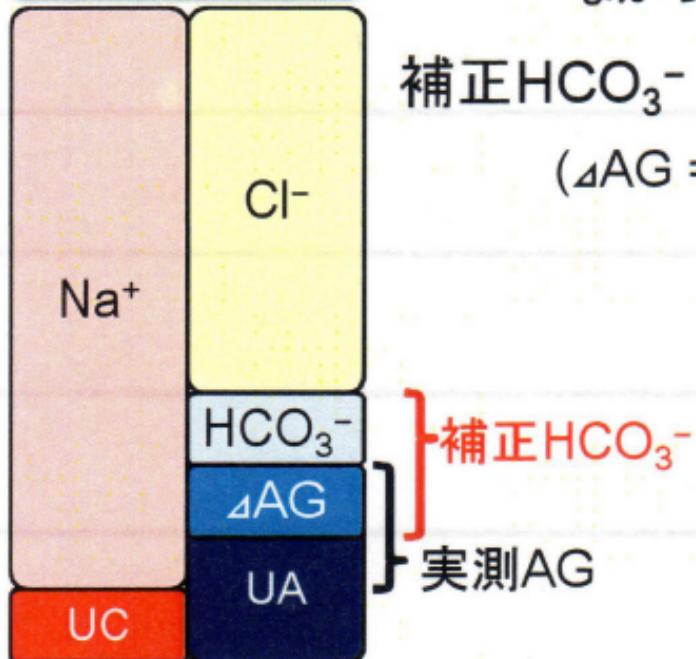
高AG性代謝性  
アシドーシス



AG上昇を起こす病態が  
なかった場合のHCO<sub>3</sub><sup>-</sup>

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

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



補正HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> < 24mEq/L

↳ 正常AG性(高Cl<sup>-</sup>性)代謝性  
アシドーシスの合併

補正HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> > 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、 $\text{PCO}_2$  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くば、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°C、脈拍110/分、血圧100/60mmHg、

呼吸数22回/分、SpO<sub>2</sub> 99%(room air)、JCS 100。



## 動脈血ガス

pH : 7.42

PCO<sub>2</sub> : 18mmHg

HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> : 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、 $\text{PCO}_2$  : 18mmHg、 $\text{HCO}_3^-$  : 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<sub>2</sub> : 18mmHg、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> : 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的異常に対して予測の範囲内か？

⑤AGが上昇している場合、補正HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>は？

# 最初の症例 ~50歳代 男性 意識障害~

pH : 7.42、PCO<sub>2</sub> : 18mmHg、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> : 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 正常AG性	不揮発性酸の蓄積 $\text{HCO}_3^-$ の喪失	余分な酸を排泄させる 失われた塩基を補充する
代謝性アルカローシス	CI反応性 CI抵抗性	酸の喪失と循環血漿量減少 酸の喪失と低K血症など	循環血漿量を増やす $\text{HCO}_3^-$ の排泄など