大阪臨床検査技師会定期講習会

初心者でもわかる 血液ガスの見方・読み方

公立大学法人　大阪市立大学
医学部附属病院　中央臨床検査部
安保　浩二

血液ガス

ガス交換の指標

酸塩基平衡の指標

血液ガスに関する用語

血液ガスの量的な表現

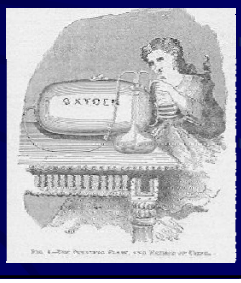
濃度（F；fraction）：vol%
含量（C；content）：ml/dl
分圧（P；partial pressure）：Torr, mmHg

ガスの存在部位

動脈血（a；arterial）
静脈血（v；venous）
混合静脈血（$\bar{v}$；mixed venous）
肺毛細管血（c；pulmonary capillary）
吸気（I；inspiratory）
呼気（E；expiratory）
肺胞気（A；alveolar）

流量を表すには、ドットをつけ、$\dot{V}$（換気量）、$\dot{Q}$(血流量）と表現する。

ガス交換の指標



酸素を吸う女性。
酸素療法は1920年代からあった。

血液ガスの各パラメーター

- ガス交換の指標
  PaO_2、SaO_2
  PaCO2
- 酸塩基平衡の指標
  pH、HCO_3^-、BE、
  $PaCO_2$

ガス交換の指標

PaO_2；酸素分圧

血液酸素化能力を代表している。

＜規定因子＞

① 環境；大気圧と酸素濃度（FIO_2）
② 肺胞換気量
③ 肺胞におけるガス交換能力
(換気/血流比、拡散能、シャント)

PaO_2 の規定因子

① 環境；大気圧と酸素濃度（FIO_2）

エベレストのふもとに住むシェルパ族。
普段の生活環境中の酸素分圧が 50mmHg 程度しかない。

PaO_2 の規定因子

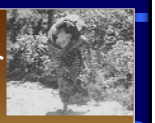
① 環境；大気圧と酸素濃度（FIO_2）

通常環境下

大気圧（P_B）760 mmHg
O2濃度　21%
760×0.21= 160 mmHg

肺内（PIO_2）
760 - 47= 713
713×0.21= 150 mmHg

エベレスト



大気圧（P_B）253 mmHg
O2濃度　21%
253×0.21= 53 mmHg

肺内（PIO_2）
253 - 47= 206
206×0.21= 43 mmHg

PaO_2 の規定因子

① 環境；大気圧と酸素濃度（FIO_2）

肺胞気酸素分圧

$$P_{AO_2} = (P_B - 47) \times F_{IO_2} - \frac{PaCO_2}{0.8}$$

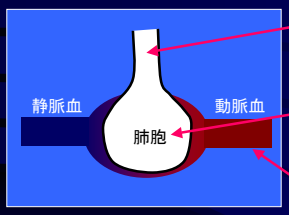
通常環境下

760 - 47 = 713
713×0.21 = 150 mmHg
150 - 40/0.8 = 100 mmHg

エベレスト

253 - 47 = 206
206×0.21 = 43 mmHg
43 - 40/0.8 = -7 mmHg
43 - 7.5/0.8 = 34 mmHg

大気圧（P_B）760 mmHg
O2濃度　21%
760×0.21= 160 mmHg



肺内（PIO_2）
760 - 47= 713
713×0.21= 150 mmHg

肺胞気（PAO_2）
（760 – 47）×0.21- 40/0.8
= 100 mmHg

動脈血（PaO_2）
100 -（$AaDO_2$）= 95 mmHg

$AaDO_2$（肺胞気-動脈血酸素分圧較差）
ガス交換障害の指標。正常値 = 5 mmHg

PaO_2 の規定因子

① 環境；大気圧と酸素濃度（FIO_2）

酸素吸入装置	酸素流量（L／分）	吸入酸素濃度 FIO_2
鼻カニューラ	1	0.21～0.24
	2	0.23～0.28
	3	0.27～0.34
	4～6	0.32～0.50
プラスチックマスク（単純）	1～2	0.21～0.24
	3～4	0.25～0.32
	5～6	0.30～0.50

PaO_2 の規定因子

① 環境；大気圧と酸素濃度（FIO_2）

例）鼻カニューラで 3 L／分 の吸入の場合
（pCO2 = 48 mmHg、A-aDO2 = 30 mmHg）

肺内（PIO2）
（760 - 47）×0.34 = 242（mmHg）

肺胞気（PAO2）
242 - 48/0.8 = 182（mmHg）

動脈血（PaO2）
182 - 30 = 152（mmHg）

PaO_2 の規定因子

② 肺胞換気量

分時換気量（$\dot{V}_E$）

1回換気量（TV）×呼吸数（RR）

TV = 500 ml、RR = 15 /min

$\dot{V}_E$ = 500 ×15 = 7500 ml/min

↓ 実際のガス交換に関与したのは

肺胞換気量（$\dot{V}_A$）

（1回換気量－死腔量）×呼吸数

$\dot{V}_A$ =（500－150）×15 = 5250 ml/min

PaO_2 の規定因子

② 肺胞換気量

低酸素血症における呼吸調節

O_2 ↓

↓

Chemorecepter

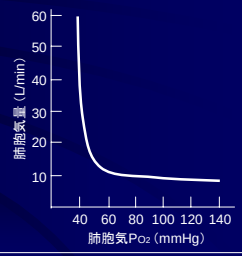
（頚動脈小体、大動脈小体）

↓

換気量増大

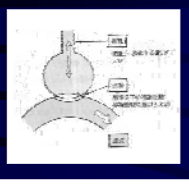
↓

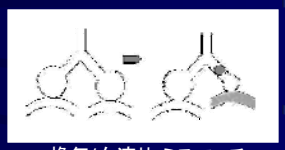
O_2 ↑



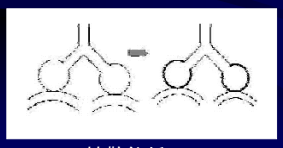
PaO_2 の規定因子

③ 肺胞におけるガス交換能力
＜換気/血流比、拡散能、シャント＞

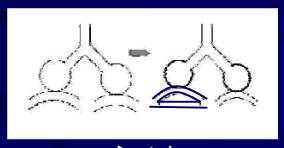




換気/血流比 ミスマッチ



拡散能低下



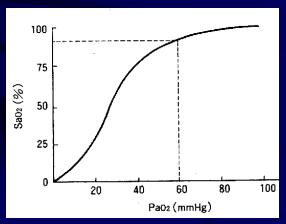
シャント

ガス交換の指標

SaO_2；酸素飽和度

血中Hb と何%結合しているかを表す。

PaO_2 と相関（酸素解離曲線）。



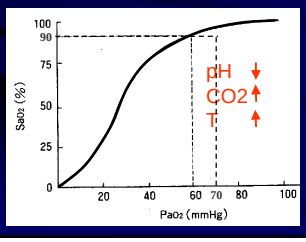
SaO_2；酸素飽和度

pH による Hb の O_2 に対する親和性の変化を Bohr 効果という。

右方シフトは酸素親和性の低下を意味し、Hb が酸素を離しやすくなるので末梢組織への酸素運搬量は増加する。

Deoxy Hb は oxy Hb と比べて H^+ と強く結合し末梢組織での酸性化を抑制する。

$$pH = \log \frac{1}{H^+}$$



Christian Bohr, 1855～1911

ガス交換の指標

$PaCO_2$；二酸化炭素分圧

肺胞換気量の指標である。

高ければ肺胞換気量は不十分であり、

低ければ過剰換気状態にある。

$$PaCO_2 = 0.863 \times \frac{\text{二酸化炭素産生量}}{\text{肺胞換気量}}$$

呼吸調節　CO_2 ↑→ chemorecepter → 換気量↑→ CO_2 ↓

（延髄や血管壁）

ガス交換の指標

まとめ

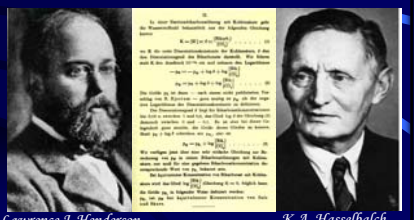
PaO_2； 環境（大気圧、酸素濃度）・肺胞換気量・ガス交換能（換気/血流比、拡散能、シャント）に規定される。

SaO_2； pH↓、CO_2↑、温度↑などで右方推移（Bohr 効果）。Hbが酸素を離しやすくなることで末梢組織への酸素運搬量を増やすと同時に、酸性化を抑制する。

$PaCO_2$；

$$PaCO_2 = 0.863 \times \frac{\text{二酸化炭素産生量}}{\text{肺胞換気量}}$$

酸塩基平衡の指標



Lawrence J. Henderson
1878～1942

K.A. Hasselbalch
1874～1962

酸・塩基の定義

（Brønsted の定義）

酸： H^+を離す

例）$HCl \rightarrow H^+ + Cl^-$
$H_2CO_3 \rightarrow H^+ + HCO_3^-$

塩基： H^+を受け取る

＜水酸基（OH^-）をつくる＞

例）$NaOH \rightarrow Na^+ + OH^-$
$NH_3 + H_2O \rightarrow NH_4^+ + OH^-$

酸塩基平衡

体細胞の生命活動が正常に営まれる為には、細胞外液のpHが一定に保たれる必要がある

体内では絶えず、呼吸酸・代謝酸が産生され、常に酸性化の危険性がある

血液、体液などの酸性・アルカリ性のバランスを酸塩基平衡といい、pHを一定に保つため様々な緩衝系が働く。

酸の代謝

体内で1日に産生する CO_2 は、約20,000mEqと言われる。このうち、大部分は呼吸により肺から体外（空気中）に排泄される。うち、一部は、腎臓の尿細管から尿中に排泄される。

CO2 以外に栄養素の代謝によって生じる酸は1日でごく少ない（約70mEq）。主に腎臓から排泄される。

生体の酸

- 呼吸酸（揮発酸）→ 肺により排出
  ；細胞の代謝により生じたCO_2
- 代謝酸（不揮発酸）→ 腎から排泄
  ；栄養素の代謝により生じるもの
  1. 糖質 → 有機酸（ピルビン酸、乳酸など）
  2. 蛋白質 → リン酸
  3. 脂質 → ケトン体（アセト酢酸、β-ハイドロオキシ酪酸）

酸塩基平衡の調節因子

1. 体液の緩衝作用
2. 呼吸によるPco_2の調節
3. 腎臓によるHCO_3再吸収

酸塩基平衡の調節因子

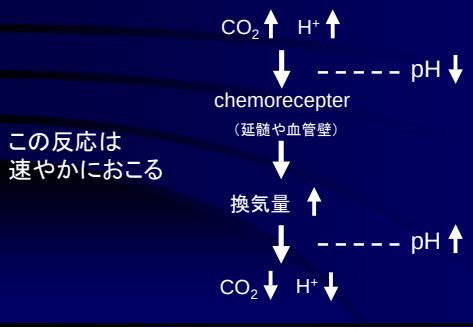
1. 体液の緩衝作用

陰イオンが H^+ を中和して、表面上の血液 pH の変動を防ぐ

- 重炭酸緩衝系（炭酸-重炭酸系）
- ヘモグロビン系
- 血漿蛋白質系
- リン酸系

酸塩基平衡の調節因子

2. 呼吸による Pco_2 の調節



この反応は
速やかにおこる

酸塩基平衡の調節因子

3. 腎臓による HCO_3 再吸収

- H^+ を排泄
  酸を体外へ
- HCO_3^- を再吸収
  塩基は体内へ

この反応は
遅い

血液ガスの各パラメーター

- ガス交換の指標
  PaO_2、SaO_2
  PaCO2
- 酸塩基平衡の指標
  pH、HCO_3^-、BE、
  $PaCO_2$

酸塩基平衡の指標

pH ; Pounds of Hydrogenii

酸性か塩基（アルカリ）性かの指標
水素イオン([H+])の量を示している
水素濃度の逆数の常用対数

$$pH = \log \frac{1}{H^+}$$

pH の規定因子

＜Henderson-Hasselbalch の式＞

$$pH = pK_A + \log \frac{[HCO_3^-]}{[H_2CO_3]}$$

$$pH = 6.1 + \log \frac{[HCO_3^-]}{0.03 \times P_{CO_2}}$$

→ 代謝性因子

→ 呼吸性因子

pH に関する用語

アシデーミア；
動脈血pHが正常（7.40±0.05）より減少

アシドーシス；
血液が酸性になるような病態（変化）

アルカレーミア；
動脈血pHが正常（7.40±0.05）より増加

アルカローシス；
血液が酸性になるような病態（変化）

酸塩基平衡の指標

$PaCO_2$；二酸化炭素分圧

肺による酸塩基平衡の調節因子

$$PaCO_2 = 0.863 \times \frac{\text{二酸化炭素産生量}}{\text{肺胞換気量}}$$

- **低い → 呼吸性アルカローシス**
- **高い → 呼吸性アシドーシス**

酸塩基平衡の指標

HCO_3^-；重炭酸イオン

CO_2の化学的溶解のひとつの形
腎による酸塩基平衡の調節因子
- **高い → 代謝性アルカローシス**
- **低い → 代謝性アシドーシス**

$$CO_2 + H_2O \rightleftarrows H_2CO_3 \rightleftarrows H^+ + HCO_3^-$$

酸塩基平衡の指標

BE；base excess

buffer base の正常値からの偏位。
正の場合は塩基過剰
負の場合は塩基欠乏
代謝性因子の指標
－BE；代謝性アシドーシス
＋BE；代謝性アルカローシス

buffer base（BB）：生体内で緩衝に関与している塩基の総和。
正常の状態では48mEq／ 。

なぜ BEが必要か？

HCO_3^- も BE も代謝性異常をみる指標ですが、HCO_3^- は呼吸性でも（代償性に）代謝性でも変化します。
代謝性異常による HCO_3^- の増減を示す指標として考案された。
BE が変化していれば、すぐに代謝性の変化と診断できる。

酸塩基平衡の指標

まとめ

$$pH = \frac{HCO_3^-\text{（代謝性因子）}}{P_{CO_2}\text{（呼吸性因子）}}$$

P_{CO_2} が高いということは、pHは低下
⟶ 呼吸性アシドーシス

P_{CO_2} が低いということは、pHは上昇
⟶ 呼吸性アルカローシス

HCO_3^- が高いということは、pHは上昇
⟶ 代謝性アルカローシス

HCO_3^- が低いということは、pHは低下
⟶ 代謝性アシドーシス

アシドーシスの原因

呼吸性

低換気
呼吸不全
肺うっ血

代謝性

組織の低酸素
ショック
重篤な貧血
重篤な心不全

全身疾患に伴うもの
糖尿病
白血病、リンパ腫
肝不全、腎不全
敗血症

薬物
サリチル酸
アルコール
ビグアナイド

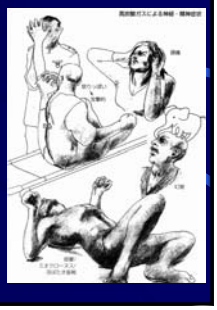
塩基の喪失
下痢
尿細管障害

呼吸性アシドーシス

呼吸性アシドーシスの症状

主には高炭酸ガス症による中枢神経症状

- ✓ 頭痛
- ✓ 興奮状態・怒りっぽい
- ✓ 集中力低下・無関心・昏睡
- ✓ 錯乱・混乱・せん妄・幻覚
- ✓ 痙攣、羽ばたき振戦



呼吸性アシドーシス

換気障害・呼吸抑制
↓
CO2 増加
↓
$CO_2 + H_2O \rightarrow H_2CO_3 \rightarrow H^+ + HCO_3^-$
H^+増加 → pH 低下
↓
HCO_3^- 再吸収増加
血中 HCO_3^- 上昇
↓
pHを修復(代償性)

代償機転

代謝性アシドーシス

代謝性アシドーシスの症状

主に、pH↓（H^+ 上昇）による症状
換気量増加・カテコラミン増加
末梢循環不全・血圧低下・うっ血

- ✓ 過換気
- ✓ 冷たく湿った皮膚
- ✓ 頻脈・不整脈
- ✓ 右室の拡張
- ✓ 意識レベルの低下

代謝性アシドーシス

酸の蓄積
↓ H^+ 増加

$H^+ + HCO_3^- \rightarrow H_2CO_3 \rightarrow CO_2 + H_2O$

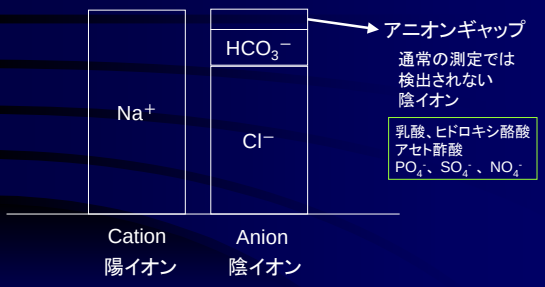
HCO_3^-低下 → pH 低下↓

H^+ による換気増加
HCO_3^- 再吸収増加
血中 HCO_3^- 上昇

代償機転

↓
pHを修復(代償性)

アニオンギャップ



$AG = Na^+ - (Cl^- + HCO_3^-)$　正常 = 12

アニオンギャップによる代謝性アシドーシスの分類

AG 正常

1）尿細管性アシドーシス
2）下痢
3）高カロリー輸液
4）尿管腸瘻

AG 上昇

1）腎不全
2）糖尿病性ケトアシドーシス
3）乳酸性アシドーシス
4）飢餓
5）アルコール中毒

アルカローシス

呼吸性

代謝性

アルカレーミアの要因

$$pH = \frac{[HCO_3^-]}{0.03 \times P_{CO_2}}$$

→ 代謝性因子
→ 呼吸性因子

HCO_3^- が増加する病態
代謝性アルカローシス
P_{CO2} が低下する病態
呼吸性アルカローシス

呼吸性アルカローシス

呼吸性アルカローシスの原因

- CO_2 の低下

→ 過換気

過換気のおきる病態

低酸素血症
- 肺炎、気管支喘息
- 肺線維症
- うっ血性心不全
- 右左シャント

呼吸中枢
- 脳血管障害
- 脳炎・髄膜炎
- 脳腫瘍
- 過換気症候群

その他
- 胸水
- 肝硬変
- 妊娠
- 低酸素環境（高地）
- 高度貧血

呼吸性アルカローシスの症状

- めまい
- しびれ
- 失神
- 痙攣

→ $PaCO_2$ 低下による脳血流低下（血管収縮）の影響が大きい

代謝性アルカローシス

代謝性アルカローシスの原因

- H^+ の喪失
- HCO_3^- の排泄低下

代謝性アルカローシス

H^+ の喪失

嘔吐

↓

H^+ の喪失

↓

$CO_2 + H_2O \rightarrow H_2CO_3 \rightarrow H^+ + HCO_3^-$

HCO_3^- 増加 → pH 上昇

代謝性アルカローシス

HCO_3^- の排泄低下

利尿剤

↓

Na^+ の排泄促進

↓

Cl^-、K^+ 排泄促進

陰イオンのバランス維持　　低K血症

HCO_3^- の排泄低下

代謝性アルカローシスの症状

低換気

低血圧

意識障害

低換気　CO_2 を上昇させ、pH を下げようとする代償機転。

血液ガスの読み方

1） pHは？

2） pH の変化の原因は？

一次性因子を考える

3） AG（アニオンギャップ）は？

代謝性アシドーシスの場合

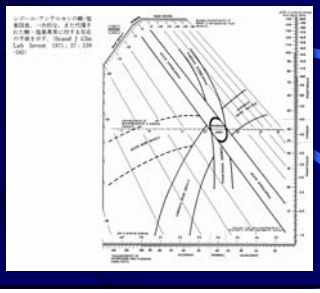
4） 代償性は？

5） 現病歴、症状などから病態を考える.

正常値

pH	7.400±0.05	
pCO2	40±5	mmHg
pO2	104 – 0.25×年齢	mmHg
BE	-3 ～ 3	mmol/L
HCO_3^-	24±2	mmol/L
SaO2	97～98	%

症例検討



症例　1

72 歳 女性。呼吸苦。

pH	7.373	
pCO2	62.7	mmHg
pO2	65	mmHg
BE	8.7	mmol/L
HCO_3^-	35.6	mmol/L
SaO2	93.9	%

1） pHは？

pH = 7.373 であり、 正常である

4） 代償性は？

CO2 が高いわりに pHが正常。
$HCO3^-$ が 35.6 と上昇
腎による代償が働き、pHは正常化している

5） 現病歴、症状などから病態を考える.

症状;呼吸苦
A-aDO_2 は 11.2 と正常上限（正常10未満）でガス交換に関してはほぼ正常と考える。代償性に pH も正常化していることから、慢性的な肺胞低換気（神経・筋疾患など）による低酸素血症を疑う。

低酸素血症を伴う慢性呼吸性アシドーシス

症例　2

9 歳 女児。

pH	7.252	
pCO2	10.6	mmHg
pO2	121	mmHg
BE	-21.8	mmol/L
HCO_3^-	4.5	mmol/L
SaO2	98.1	%

1） pHは？

pH = 7.252 であり、 アシデーミアである

2） pH の変化の原因は？

pCO2 = 10.6、HCO_3^- = 4.5、BE = -21.8
であり、HCO_3^- による変化が主と考えられる

3） AG（アニオンギャップ）は？

（Na=117、K=5.1、Cl=78、HCO_3=4.5）
$AG = Na^+ - (Cl^- + HCO_3^-)$
= 117 - (78 + 4.5) = 34.5 （正常12）

4） 代償性は？

HCO_3^-、BE が 著明に減少。一次性因子は代謝性が考えられる
呼吸による代償作用は、働いているがpHの是正には至っていない。

5） 現病歴、症状などから病態を考える.

アニオンギャップが高い、高血糖（1146）、抗GAD抗体陽性などより糖尿病性ケトアシドーシスと考える。

代謝性アシドーシス
（糖尿病性ケトアシドーシス）

症例　3

77歳、男性。拡張型心筋症、心不全。

pH	7.209	
pCO2	59.4	mmHg
pO2	74.5	mmHg
BE	-5.1	mmol/L
HCO_3^-	22.8	mmol/L
SaO2	91.5	%

1） pHは？

pH = 7.209 であり、 アシデーミアである

2） pH の変化の原因は？

pCO2 = 59.4、HCO_3^- = 22.8、BE = -5.1 であり、CO_2 による変化

4） 代償性は？

BE、HCO3-は、ほぼ正常範囲。pHはアシデーミアであり、
代償は働いていない

5） 現病歴、症状などから病態を考える.

現病歴;心不全

聴診、胸部レントゲン、心エコーなどにより、うっ血性心不全と診断。
心不全による肺うっ血により、換気と拡散の両者が障害されるため、
PaO_2の低下と $PaCO_2$ の上昇を認める。

低酸素血症を伴う急性呼吸性アシドーシス

症例　4

67 歳 男性。食道癌術後。

pH	7.087	
pCO2	144.4	mmHg
pO2	70.9	mmHg
BE	9.6	mmol/L
HCO_3^-	41.6	mmol/L
SaO2	91.2	%

1） pHは？

pH = 7.087 であり、 アシデーミアである

2） pH の変化の原因は？

pCO2 = 144.4、HCO_3^- = 41.6、BE = 9.6
であり、CO_2 による変化が主と考えられる

4） 代償性は？

BEが9.6、HCO_3^- が41.6 と増加。代償作用は働いているが
pH はアシデーミアであり代償しきれていない

5） 現病歴、症状などから病態を考える.

食道癌術後にMRSA肺炎を合併。右肺は膿胸となりほぼ無気肺。
酸素 7L を開始。その後、CO_2 ナルコーシスを合併したと考える。

慢性呼吸性アシドーシス（CO_2ナルコーシス疑い）

代償変化の限界

病態	代償変化	限界値
呼吸性アシドーシス	HCO_3^- ↑	HCO_3^- 急性 = 30 mEq/l 慢性 = 42 mEq/l
呼吸性アルカローシス	HCO_3^- ↓	HCO_3^- 急性 = 18 mEq/l 慢性 = 12 mEq/l
代謝性アシドーシス	CO_2 ↓	$PaCO_2$ = 15 mmHg
代謝性アルカローシス	CO_2 ↑	$PaCO_2$ = 60 mmHg

CO_2 ナルコーシス

CO_2蓄積に伴う意識障害であり、正確には脳内のアシドーシスに起因する

CO_2 が高い慢性呼吸不全患者

CO_2 に対する反応低下 ↓ 低酸素による換気刺激が主

↓

高濃度酸素の投与

↓

換気量低下

↓

さらなる CO_2の上昇

症例　5

14歳 女性。

pH	7.233	
pCO2	35.6	mmHg
pO2	24.6	mmHg
BE	-11.6	mmol/L
HCO_3^-	14.5	mmol/L
SaO2	47.5	%

（静脈血）

酸塩基平衡の評価は

静脈血でも可能である

1） pHは？

静脈血ではあるが pH = 7.233 であり、アシデーミアである

2） pH の変化の原因は？

pCO2 = 35.6、HCO_3^- = 14.5、BE = -11.6 であり、HCO_3^- による変化が主と考えられる

3） AG（アニオンギャップ）は？

AG = Na^+ - (Cl^- + HCO_3^-) = 142 - (105 + 14.5) = **22.5**（正常12）

4） 代償性は？

HCO_3^-、BEが減少。静脈血のため、呼吸の代償が働いているかは不明。
ただし、pHはアシデーミアのため、代償作用は効いていないと考える

5） 現病歴、症状などから病態を考える.

症状：全身倦怠感　汎血球減少症、高乳酸血症を認める。
他の検査により急性未分化型白血病と診断された。

高乳酸血症による代謝性アシドーシス

症例　6

65歳、女性。

pH	7.527	
pCO2	25.1	mmHg
pO2	97.5	mmHg
BE	-1.6	mmol/L
HCO_3^-	20.8	mmol/L
SaO2	98.6	%

1） pHは？

pH = 7.527 であり、 アルカレーミアである

2） pH の変化の原因は？

pCO2 = 25.1 であり、CO_2 による変化が主と考えられる

4） 代償性は？

BE、HCO_3^- は、若干の低下。代償作用は働き始めるところであると考える。

5） 現病歴、症状などから病態を考える.

現病歴：卵巣癌
胸水貯留による過換気。

（慢性）呼吸性アルカローシス

症例　7

67 歳 男性。

pH	7.498	
pCO2	28.4	mmHg
pO2	68.2	mmHg
BE	-0.4	mmol/L
HCO_3^-	21.8	mmol/L
SaO2	96.6	%

1） pHは？

pH = 7.498 であり、 アルカレーミアである

2） pH の変化の原因は？

$PaCO_2$ = 28.4 であり、CO_2 による変化が主と考えられる

4） 代償性は？

HCO3 = 21.8 とほぼ正常範囲。一次性因子は呼吸性であり、代償は働いていない。

5） 現病歴、症状などから病態を考える.

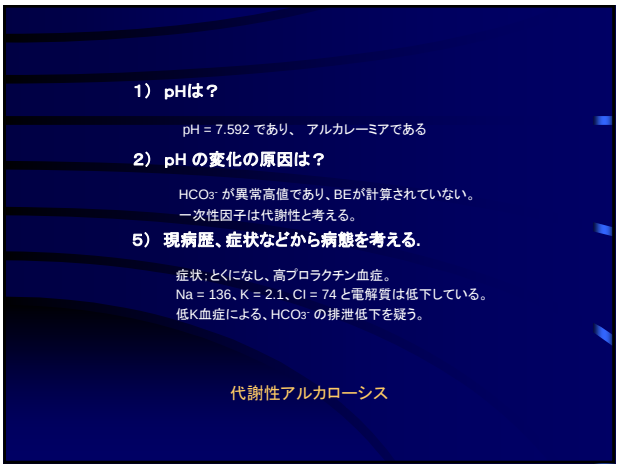
急性心筋梗塞によるうっ血性心不全
PaO_2 = 68.2 であり、低酸素血症による
過換気（$PaCO_2$ = 28.4）が主な原因と考える。

低酸素血症に伴う呼吸性アルカローシス

症例　8

42 歳　女性。

pH	7.592	
pCO2	64.4	mmHg
pO2	87	mmHg
BE	***	mmol/L
HCO_3^-	62.5	mmol/L
SaO2	98.4	%


1） pHは？
pH = 7.592 であり、 アルカレーミアである
2） pH の変化の原因は？
HCO3- が異常高値であり、BEが計算されていない。
一次性因子は代謝性と考える。
5） 現病歴、症状などから病態を考える.
症状：とくになし、高プロラクチン血症。
Na = 136、K = 2.1、Cl = 74 と電解質は低下している。
低K血症による、HCO3- の排泄低下を疑う。
代謝性アルカローシス