

**酸塩基平衡を紐解く**  
 Acid-base balance  
**(基礎講座)**  
(basic lecture)

**米澤 智洋**  
 Tomahiro Yonezawa  
**東京大学 獣医臨床病理学研究室**  
 The University of Tokyo

1

演題発表に関連し、開示すべきCOI 関係にある  
 企業などはありません。  
  
 COI: Nothing to disclosure

2

**Acid-Base**  
Kate Hogarty, et al., 2023

**A Quick Reference on Anion Gap and Strong Ion Gap**  
Caitlin Turner, et al., 2023

**KEY POINTS**  
 1. The anion gap is a calculated value that helps identify the presence of unmeasured anions.  
 2. The strong ion gap (SIG) is a calculated value that helps identify the presence of unmeasured strong ions.  
 3. Both the anion gap and SIG are useful tools for diagnosing acid-base disorders.

**INTRODUCTION**  
 Acid-base balance is a complex system that involves the regulation of pH in the body. The anion gap and strong ion gap are two important tools for diagnosing acid-base disorders.

**CONCLUSION**  
 The anion gap and strong ion gap are useful tools for diagnosing acid-base disorders.

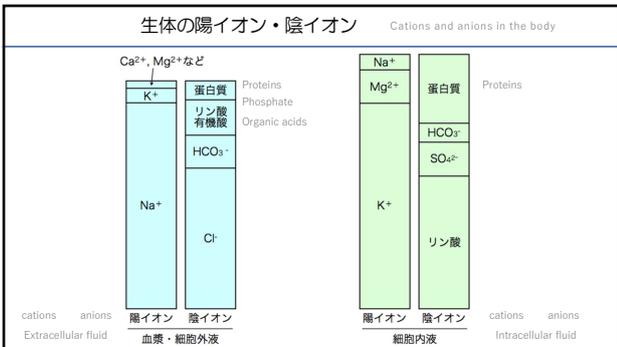
**REFERENCES**  
 1. Kohnen S, et al. (2023) Anion Gap and Strong Ion Gap. *Veterinary Clinics of North America: Small Animal Practice* 47(2): 191-196, 2017  
 2. Turner C, et al. (2023) A Quick Reference on Anion Gap and Strong Ion Gap. *Veterinary Clinics of North America: Small Animal Practice* 53(1): 191-206, 2023

3

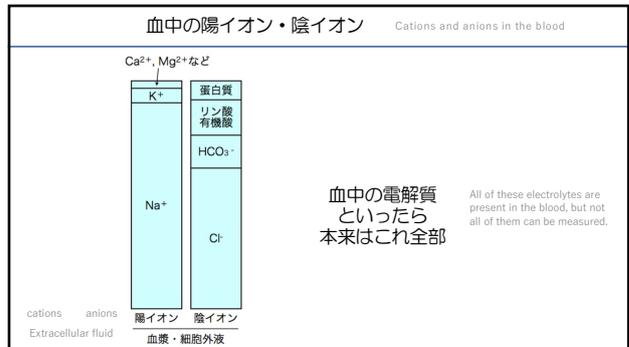
**酸と塩基の平衡機序** Mechanism

- 酸と塩基の平衡機序 Mechanism
- 酸塩基平衡の異常 Disorders
- 複雑な異常 Complex disorders
- まとめ Summary

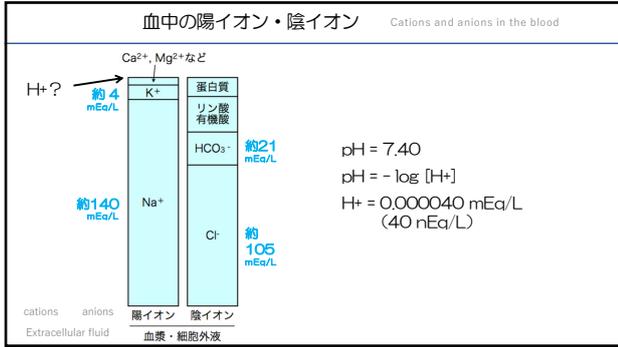
4



5



6



7

### H<sup>+</sup>(酸)の発生 Acids in the body

**揮発性酸 (volatile acid)**

- It is produced by the metabolism of carbohydrates and fats  
 $CO_2 + H_2O \rightleftharpoons H_2CO_3$   
 → Excreted through the lungs by breathing (App. 300 mEq/kg/day)

**不揮発性酸 (non-volatile acid)**

- It is produced by protein metabolism  
 $NO_4^{2-}$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $HPO_4^{2-}$  など  
 → It cannot be excreted from the lungs but excreted in urine by the kidneys (App. 1 mEq/kg/day)

8

### 酸の負荷に対する反応 Response to acids

- 細胞外液による緩衝**  
炭酸-重炭酸緩衝系 ( $HCO_3^-$ )
- 細胞内液による緩衝**
- 呼吸性代償**
- 腎臓による酸の排泄**
  - Decrease in urinary pH
  - Titrateable acid ( $H_2PO_4^-$ )
  - Excretion of  $NH_4^+$

9

### 1. 炭酸・重炭酸緩衝系 (細胞外液) 1. Carbonate-bicarbonate buffer system (Extracellular fluid)

細胞の代謝 Cell Metabolism

$$CO_2 + H_2O \leftrightarrow H_2CO_3 \leftrightarrow [H^+] + HCO_3^-$$

10

### 1. 炭酸・重炭酸緩衝系 (不揮発性酸も緩衝) 1. Carbonate-bicarbonate buffer system (balanced for non-volatile acid)

細胞の代謝 Cell Metabolism

$$CO_2 + H_2O \leftrightarrow H_2CO_3 \leftrightarrow [H^+] + HCO_3^-$$

$$H_2SO_4 + 2Na^+ + 2HCO_3^- \rightarrow Na_2SO_4 + 2CO_2 + 2H_2O$$

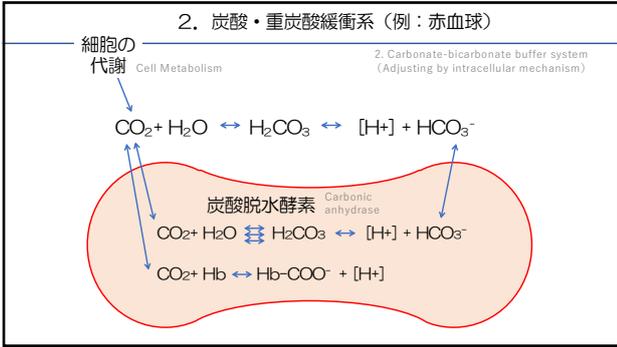
$$HCl + Na^+ + HCO_3^- \rightarrow NaCl + CO_2 + H_2O$$

11

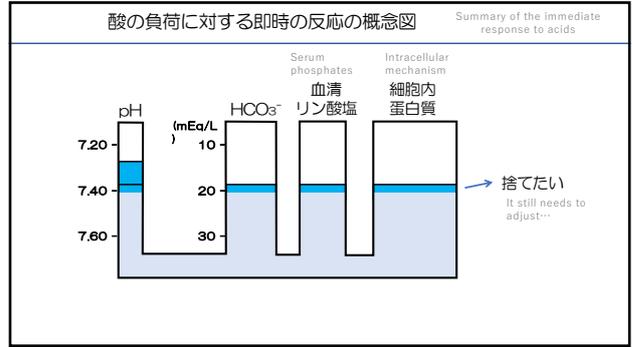
### 酸の負荷に対する反応 Response to acids

- 細胞外液による緩衝**  
炭酸-重炭酸緩衝系 ( $HCO_3^-$ )
- 細胞内液による緩衝**  
蛋白質、リン酸、ヘモグロビン
- 呼吸性代償**
- 腎臓による酸の排泄**
  - Decrease in urinary pH
  - Titrateable acid ( $H_2PO_4^-$ )
  - Excretion of  $NH_4^+$

12



13



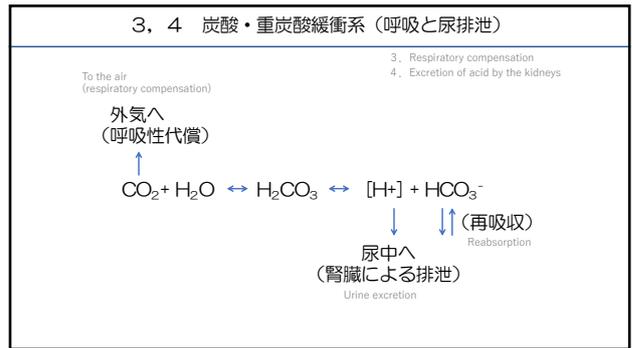
14

### 酸の負荷に対する反応

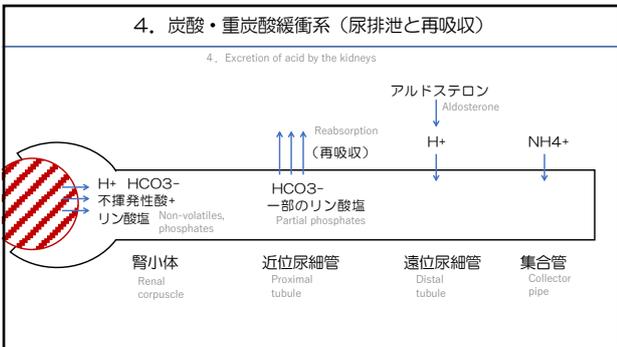
Response to acids

<p><b>1. 細胞外液による緩衝</b> 炭酸-重炭酸緩衝系 (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>)</p> <p><b>2. 細胞内液による緩衝</b> 蛋白質、リン酸、ヘモグロビン</p> <p><b>3. 呼吸性代償</b></p> <p><b>4. 腎臓による酸の排泄</b></p> <p>① 尿pHの低下 ② 滴定酸 (H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup>) ③ NH<sub>4</sub><sup>+</sup> の排泄</p>	<p>1. Extracellular fluid Carbonate-bicarbonate buffer system (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>)</p> <p>2. Intracellular fluid Protein, phosphate, hemoglobin</p> <p>3. Respiratory compensation</p> <p>4. Excretion of acid by the kidneys ① Decrease in urinary pH ② Titratable acid (H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup>) ③ Excretion of NH<sub>4</sub><sup>+</sup></p>
---	---

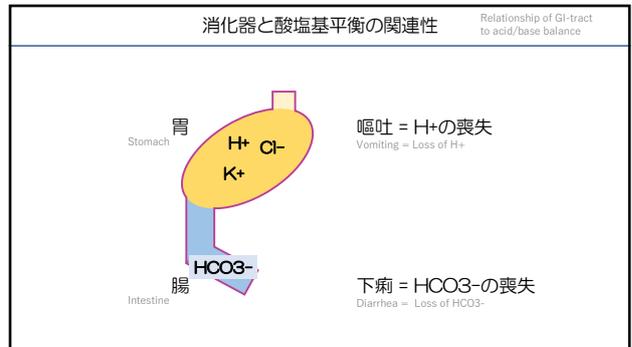
15



16



17



18

酸塩基平衡を紐解く (基礎講座)		Acid-base balance (basic lecture)
• 酸と塩基の平衡機序	Mechanism	
• 酸塩基平衡の異常	Disorder	
• 複雑な異常	Complex disorders	
• まとめ	Summary	

19

用語の整理		Terminology
<b>アシデミア</b>	血液pHが基準範囲より低い状態 (=酸血症)	Acidemia Blood pH below normal range
<b>アルカレミア (アルケミア)</b>	血液pHが基準範囲より高い状態 (=アルカリ血症)	Alkalemia, alkemia Blood pH above normal range
<b>アシドーシス</b>	pHを下げようとする (= HCO3 <sup>-</sup> を下げる、またはPCO2を上げる) 病態がある	Acidosis Condition which is lowering pH (= lower HCO3 <sup>-</sup> or raise PCO2)
<b>アルカローシス</b>	pHを上げようとする (= HCO3 <sup>-</sup> を上げる、またはPCO2を下げる) 病態がある	Alkalosis Condition which is raising pH (= raise HCO3 <sup>-</sup> or lower PCO2)

20

アシドーシス		Acidosis
<b>代謝性アシドーシス</b>	不揮発性酸が尿中に十分に排泄されない、または過剰に産生されて排泄しきれない状態	Metab. acidosis Conditions in which non-volatile acids are not sufficiently excreted in the urine or are produced in excess and cannot be excreted.
<b>呼吸性アシドーシス</b>	揮発性酸が換気低下により十分に排泄されない状態	Resp. Acidosis A condition in which volatile acids are not sufficiently excreted due to decreased ventilation

21

Henderson-Hasselbalch の式

$$pH = 6.1 + \log \frac{[HCO_3^-]}{0.03 \times [PCO_2]}$$

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

22

Henderson の式

$$[H^+] = 24 \times \frac{[PCO_2]}{[HCO_3^-]}$$

呼吸による調節 (Respiration regulation)  
腎臓による調節 (Metabolic regulation)

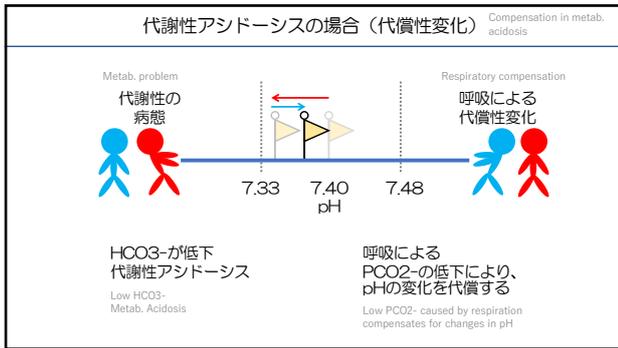


23

血液ガス (静脈血) の基準値			Reference range of blood gas (venous blood)
	犬 Dog	猫 Cat	
pH	7.33-7.42	7.33-7.42	
PCO2	36-44	32-38	
HCO3 <sup>-</sup>	20-24	18-23	

K. Hopper and S.E. Epstein. J Vet Intern Med 2012

24



25

### 酸塩基平衡異常の評価ステップ

Step-wise evaluation of acid-base disorders

- pHを評価する**  
逸脱があればアシデミアまたはアルカレミア
- PCO<sub>2</sub>、HCO<sub>3</sub>-を評価する**  
呼吸性/代謝性のアシドーシス/アルカローシス
- 代償変化が適切か評価する  
代償性変化の予測値と比較して混合性を考える
- 適切でないなら、なにが隠れているか？  
他の酸/他の疾患の存在を考える

- Evaluate pH  
Acidemia or alkalemia
- Evaluate PCO<sub>2</sub> and HCO<sub>3</sub>-  
Respiratory or metabolic, acidosis or alkalosis
- Evaluate compensatory changes  
Consider mixed compensatory changes compared to predicted compensatory changes
- If not appropriate, what is hidden?  
Consider the presence of other acids/diseases

26

### 単純性 酸塩基平衡異常の変動

The features of simple acid-base balance disorders

	pH	Initial changes		Compensation
		一次変化	代償性変化	
Metab. acidosis	↓	HCO <sub>3</sub> - ↓↓	PCO <sub>2</sub> ↓	
Metab. alkalosis	↑	HCO <sub>3</sub> - ↑↑	PCO <sub>2</sub> ↑	
Resp. acidosis	↓	PCO <sub>2</sub> ↑↑	HCO <sub>3</sub> - ↑	
Resp. alkalosis	↑	PCO <sub>2</sub> ↓↓	HCO <sub>3</sub> - ↓	

「単純性」では PCO<sub>2</sub>とHCO<sub>3</sub>-が同じ方向

27

### 代謝性アシドーシスの原因

Causes of metab. acidosis

**HCO<sub>3</sub>-の喪失**

- 下痢
- 腎不全、低アルドステロン血症
- 生理食塩水大量投与（希釈性アシドーシス）

**腎臓からのH<sup>+</sup>の分泌障害**

- 尿管障害（腎尿細管性アシドーシス）

**酸性物質の増加**

- 乳酸アシドーシス
- ケトアシドーシス
- 腎不全（末期）

**中毒物質**

- エチレングリコールなど

**呼吸性アルカローシスの代償**

Loss of HCO<sub>3</sub>-

- Diarrhea
- Renal failure, hypoaldosteronemia
- Administration of large amounts of saline

Impaired renal H secretion

- Renal tubular damage (renal tubular acidosis)

Acidic substances

- Lactic acidosis
- Ketacidosis
- Severe renal failure

Toxic substances

- Ethylene glycol, etc.

Compensation of resp. alkalosis

28

### 代謝性アルカローシスの原因

Causes of metab. alkalosis

**H<sup>+</sup>およびCl<sup>-</sup>の喪失**

- 胃酸の喪失（嘔吐、胃液抜去）

**腎臓からのH<sup>+</sup>の喪失**

- 利尿薬
- アルドステロン作用の亢進（循環血液の減少、アルドステロン症、副腎皮質機能亢進症など）

**低カリウム血症**

**呼吸性アシドーシスの代償**

Loss of H<sup>+</sup> and/or Cl<sup>-</sup>  
Loss of stomach acid (vomiting, loss of stomach acid)

Loss of H<sup>+</sup> from kidney

- Diuretics
- Increased aldosterone activity (reduced blood circulation, aldosteronism, hyperadrenocorticism, etc.)

Hypokalemia

Compensation of resp. acidosis

29

### 呼吸性アシドーシス/アルカローシスの原因

Causes of resp. acidosis/alkalosis

**呼吸性アシドーシス … 換気不全を呈する病**

- 呼吸中枢の抑制（脳疾患、麻酔、CO<sub>2</sub>ナルコーシス）
- 呼吸駆動の障害（神経、筋、圧迫）
- 気道の閉塞（上気道～気管～気管支～肺胞）
- 人工呼吸器の設定ミス
- 代謝性アルカローシスの代償性変化

**呼吸性アルカローシス … 過換気を促す病態**

- 低酸素
- 肺疾患（低酸素を伴わないことも）
- 呼吸中枢の亢進（中枢神経障害、熱中症など）
- 人工呼吸器の設定ミス
- 疼痛、恐怖、不安
- 代謝性アシドーシスの代償性変化

Resp. acidosis:

- Ventilatory failure
- Respiratory center depression
- Resp. drive disorder
- Airway obstruction
- Ventilator setting errors
- Compensation for metab. alkalosis

Resp. alkalosis:

- hyperventilation
- Hypoxia
- Lung disease
- Respiratory center hyperactivity (central nervous system disorders, heat stroke, etc.)
- Incorrect ventilator settings
- Pain, fear, anxiety
- Compensation for metab. acidosis

30

**症例1** Case 1

Mix cat, 8 y/o, Chronic bronchitis (acute)  
雑種猫 8歳、慢性気管支炎（症状は急性）

		猫 基準値 RI for cats
pH	7.15 ↓	(7.33-7.42)
PCO2	72.6 Torr ↑ (= mmHg)	(32-38)
HCO3-	25.3 mmol/L ↑ (= mEq/L)	(18-23)

- pH: 低下 … アシデミア pH low = acidemia
- PCO2: 上昇 … 呼吸性アシドーシス PCO2 high = Resp. acidosis
- HCO3-: 上昇 … 代謝性の代償性変化 HCO3- high = compensation

31

**症例2** Case 2

Mix dog, 10 y/o, Pyelonephritis  
雑種犬 10歳、腎盂腎炎

		犬 基準値 RI for dogs
pH	7.29 ↓	(7.33-7.42)
PCO2	26.8 mmHg ↓	(36-44)
HCO3-	13.0 mEq/L ↓	(20-24)

- pH: 低下 … アシデミア pH low = acidemia
- HCO3-: 低下 … 代謝性アシドーシス HCO3- low = metab. acidosis
- PCO2: 低下 … 呼吸性の代償性変化 PCO2 low = compensations

32

**症例3** Case 3

Cat 3 y/o, Pain, Tachypnea  
猫 3歳、疼痛、頻呼吸

		猫 基準値 RI for cats
pH	7.49 ↑	(7.33-7.42)
PCO2	28.5 mmHg ↓	(32-38)
HCO3-	21.6 mEq/L →	(18-23)

- pH: 低下 … アルカレミア pH high = alkalemia
- PCO2: 低下 … 呼吸性アルカローシス PCO2 low = resp. alkalosis
- HCO3-: 変化なし … 急性期では代償性変化が小さいことも HCO3- low = no change, that happens for metab. compensations especially in cats

33

**症例4** Case 4

Cat 9 y/o, Chronic vomiting, hiatal hernia  
猫 9歳、慢性嘔吐（食道裂孔ヘルニア）

		猫 基準値 RI for cats
pH	7.49 ↑	(7.33-7.42)
PCO2	40.9 mmHg ↑	(32-38)
HCO3-	31.2 mEq/L ↑↑	(18-23)

- pH: 上昇 … アルカレミア pH high = alkalemia
- HCO3-: 上昇 … 代謝性アルカローシス HCO3- high = metab. alkalosis
- PCO2: 上昇 … 呼吸性の代償性変化 PCO2 high = compensations

34

**酸塩基平衡を紐解く** Acid-base balance (basic lecture)  
(基礎講座)

- 酸と塩基の平衡機序 Mechanism
- 酸塩基平衡の異常 Disorders
- **複雑な異常** Complex disorder
- まとめ Summary

35

**酸塩基平衡の異常** Causes of metab. alkalosis

Simple acid-base balance disorders  
Metabolic acidosis or alkalosis  
Respiratory acidosis or alkalosis

**単純性酸塩基平衡異常**

代謝性アシドーシス または アルカローシス  
呼吸性アシドーシス または アルカローシス

Complex acid-base balance disorders  
Two or more simultaneous acid-base disorders  
• Values are different from predicted values  
• Anion gap (AG) is elevated

**混合性酸塩基平衡障害**

2つ以上の酸塩基平衡の異常が同時に発生している状態

- **代償性変化が予測値よりも大幅にずれている**
- アニオンギャップ (AG) の上昇がある

36

Predicted range of compensation  
代償性変化には大体の予測範囲がある (±3くらい)

	一次変化 Initial change	代償性変化 Compensation
	HCO3-が 21 mEq/Lから	PCO2は 基準範囲の中央値から From the median of RI
Metab. acidosis 代謝性アシドーシス	1 mEq/L ↓	0.7 mmHg ↓*
Metab. alkalosis II アルカローシス	1 mEq/L ↑	0.7 mmHg ↑
	PCO2が 基準範囲の中央値から 1 mmHg ↓	HCO3-は 21 mEq/Lから
Resp. acidosis 呼吸性アシドーシス	Acute 急性期: 0.15 mEq/L ↓	Chronic 慢性期: 0.35 mEq/L ↓**
Resp. alkalosis II アルカローシス	Acute 急性期: 0.25 mEq/L ↑	Chronic 慢性期: 0.55 mEq/L ↑**

(\*猫では変わらない \*\*猫では不明)  
(\*No change \*\*Unknown in cats)

Fluid, Electrolyte and Acid-Base Disorders in Small Animal Practice (4th Ed) Elsevier 2012

37

酸塩基平衡異常の評価ステップ Step-wise evaluation of acid-base disorders

- pHを評価する**  
逸脱があればアシデミアまたはアルカレミア  
1. Evaluate pH  
Acidemia or alkalemia
- PCO2, HCO3-を評価する**  
呼吸性/代謝性のアシドーシス/アルカローシス  
2. Evaluate PCO2 and HCO3- Respiratory or metabolic, acidosis or alkalosis
- 代償変化が適切か評価する**  
代償性変化の予測値と比較して混合性を考える  
3. Evaluate compensatory changes  
Consider mixed compensatory changes compared to predicted compensatory changes
- 適切でないなら、なにが隠れているか?**  
他の酸/他の疾患の存在を考える  
4. If not appropriate, what is hidden?  
Consider the presence of other acids/diseases

38

さっきの症例1 Previous case 1

雑種猫 8歳、慢性気管支炎、急性の呼吸困難 Mix cat, 8 y/o, Chronic bronchitis (acute)

	猫 基準値 RI for cats
pH	7.15 ↓ (7.33-7.42)
PCO2	72.6 mmHg ↑↑ (32-38)
HCO3-	25.3 mEq/L ↑ (18-23)

- pH: 低下 ... アシデミア pH low = acidemia
- PCO2: 上昇 ... 呼吸性アシドーシス PCO2 high = Resp. acidosis
- HCO3-: 上昇 ... 代謝性の代償性変化 HCO3- high = compensation
- HCO3- の予測値は :  $21 + 37.6 \times 0.15 \approx 26.7$   
23.7 ~ 29.7 HCO3- Prediction = 23.7-29.7

→ 代謝性代償は十分に行われている = 単純性 → Metab. compensation is sufficient = simple disorder

39

症例5 Case 5

ヨーキー、6か月、昏睡/呼吸困難、流涎に伴う低K血症 (2.5 mEq/L) Yorkie, 6 months, coma/dyspnea, hypokalemia (2.5 mEq/L)

	犬 基準値 RI for dogs
pH	7.36 → (7.33-7.42)
PCO2	58.7 mmHg ↑↑ (36-44)
HCO3-	32.8 mEq/L ↑↑ (20-24)

- pH: 正常? (やや酸性寄り?) pH normal? Slightly acid
- PCO2: 上昇 ... 呼吸性アシドーシス PCO2 high = Resp. acidosis
- HCO3-: 上昇 ... 代謝性の代償性変化? HCO3- high = compensation?
- HCO3- の予測値は :  $21 + 23.7 \times 0.15 \approx 24.6$   
21.6 ~ 27.6 → 予測値以上に変動 Higher than predicted

呼吸性アシドーシス + 代謝性アルカローシスも Complex disorder: Resp. acidosis + Metab. alkalosis

40

酸塩基平衡の異常 Causes of metab. alkalosis

Simple acid-base balance disorders  
Metabolic acidosis or alkalosis  
Respiratory acidosis or alkalosis

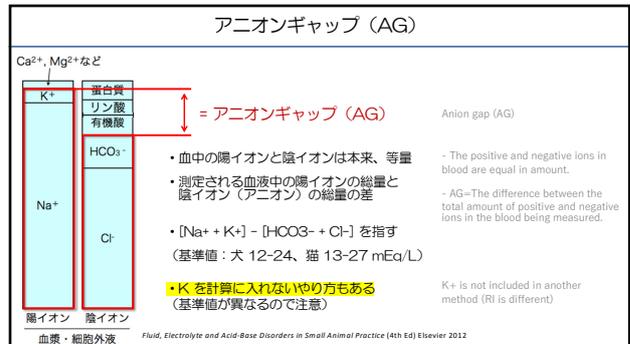
**単純性酸塩基平衡異常**  
代謝性アシドーシス または アルカローシス  
呼吸性アシドーシス または アルカローシス

Complex acid-base balance disorders  
Two or more simultaneous acid-base disorders  
Values are different from predicted values  
Anion gap (AG) is elevated

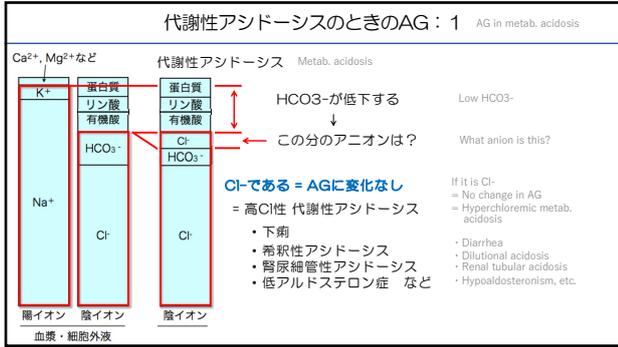
**混合性酸塩基平衡障害**  
2つ以上の酸塩基平衡の異常が同時に発生している状態

- 代償性変化が予測値よりも大幅にずれている
- アニオンギャップ (AG) の上昇がある

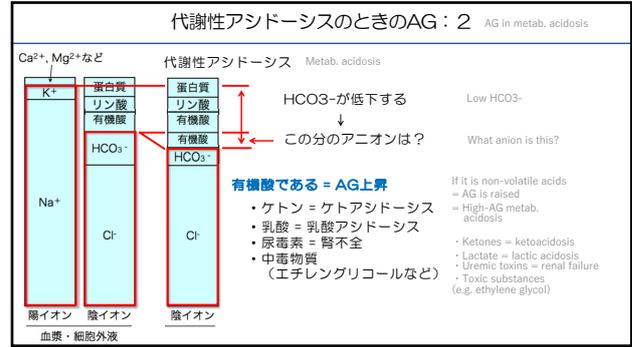
41



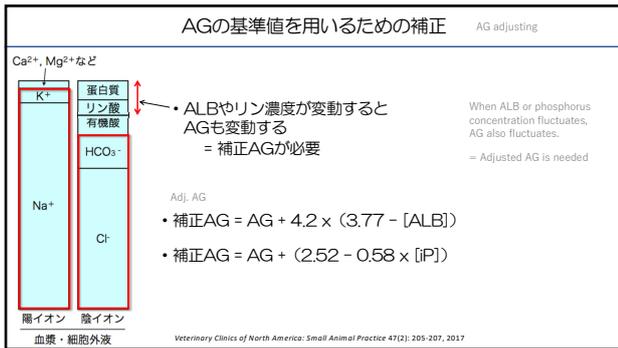
42



43



44



45

症例6 Case 6

ミニチュアダックスフント、13歳、活動性低下、嘔吐、意識レベル低下  
Miniature Dachshund, 13 y/o, Hypoactivity, vomiting, decreased level of consciousness  
T 39.8度、P 180回/分、R 35回/分 血圧76/40 (MAP54)  
敗血症ショックを疑う  
T 39.8° C, P 180, R 35 BP 76/40 (MAP 54) Suspected septic shock

46

症例6 Case 6

血液検査 BT	血液ガス分析 Blood gas	犬基準値 RI for dogs
Hct 33.9 %	pH 7.20 ↓	(7.33-7.42)
WBC 42.3 K/ $\mu$ L	PCO <sub>2</sub> 43.0 mmHg →	(36-44)
	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 16.8 mEq/L ↓	(20-24)
ALB 2.7 g/dL	AG 23.6 mEq/L	
Na 14.9 mEq/L	補正AG 28.1 mEq/L ↑	(12-24)
K 4.4 mEq/L	Lactate 乳酸 3.7 mmol/L	(<2.5)
Cl 113 mEq/L		

• pH: アシデミア  
Acidemia  
• HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 低下 ... 代謝性アシドーシス  
Metab. Acidosis  
• PCO<sub>2</sub>-予測値: 29.1~35.1 上昇 ... 呼吸性アシドーシスの併発  
Higher than predicted Complex (metab. acidosis + Resp. acidosis)  
• 補正AG: 上昇 ... AG上昇型の代謝性アシドーシス (乳酸の上昇あり = 乳酸アシドーシス)  
Adj. AG High = AG high metab. Acidosis (lact. Acidosis)

47

酸塩基平衡を紐解く (基礎講座) Acid-base balance (basic lecture)

- 酸と塩基の平衡機序 Mechanism
- 酸塩基平衡の異常 Disorders
- 複雑な異常 Complex disorders
- まとめ Summary

48

### 酸塩基平衡異常の評価ステップ

Step-wise evaluation of acid-base disorders

- |  |   |
|--|---|
| <p><b>1. pHを評価する</b><br/>逸脱があればアシデミアまたはアルカレミア</p> <p><b>2. PCO<sub>2</sub>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>を評価する</b><br/>呼吸性/代謝性のアシドーシス/アルカローシス</p> <p><b>3. 代償変化が適切か評価する</b><br/>代償性変化の予測値と比較して混合性を考える</p> <p><b>4. 適切でないなら、なにが隠れているか?</b><br/>他の酸/他の疾患の存在を考える</p> | <p><b>1. Evaluate pH</b><br/>Acidemia or alkalemia</p> <p><b>2. Evaluate PCO<sub>2</sub> and HCO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>-Respiratory or metabolic, acidosis or alkalosis</p> <p><b>3. Evaluate compensatory changes</b><br/>Consider mixed compensatory changes compared to predicted compensatory changes</p> <p><b>4. If not appropriate, what is hidden?</b><br/>Consider the presence of other acids/diseases</p> |
|--|---|

49

### 謝 辞

Acknowledgement

東京大学 附属動物医療センター  
長久保 大 先生

Dr. Dai Nagakubo  
Veterinary medical center  
The University of Tokyo

ハナベチャアニマルクリニック  
高須 寛 先生

Dr. Satoru Takasu  
HANA-PECHA Animal Clinic

50