

2026年5月28日(木) 茨城県立看護大学校資料

ガス交換

国立病院機構 茨城東病院 胸部疾患・療育医療センター
診療看護師 (Japanese Nurse Practitioner)
川崎 竹哉



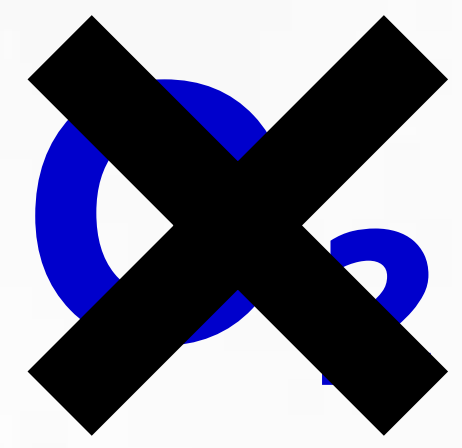
『呼吸する』

とは

『生きる』

こと





呼吸停止 = 死

『呼吸停止 = 死』の理由

1. 身体の中の**酸素 (O₂) が不足**するから
2. 身体の中の**二酸化炭素 (CO₂) が過剰**になるから

各臓器が働けなくなる

(臓器機能不全)



ヒトが呼吸する意味



各臓器が役割を全うできるようにするため

O_2 を取り込んで CO_2 を吐く理由

$O_2 = \text{ATP}$ を作る材料になる

$CO_2 = \text{pH}$ を弱アルカリ性に保つ

本日の内容

01

外呼吸と内呼吸

02

ガス (O_2 ・ CO_2) の動き

03

呼吸の調節

04

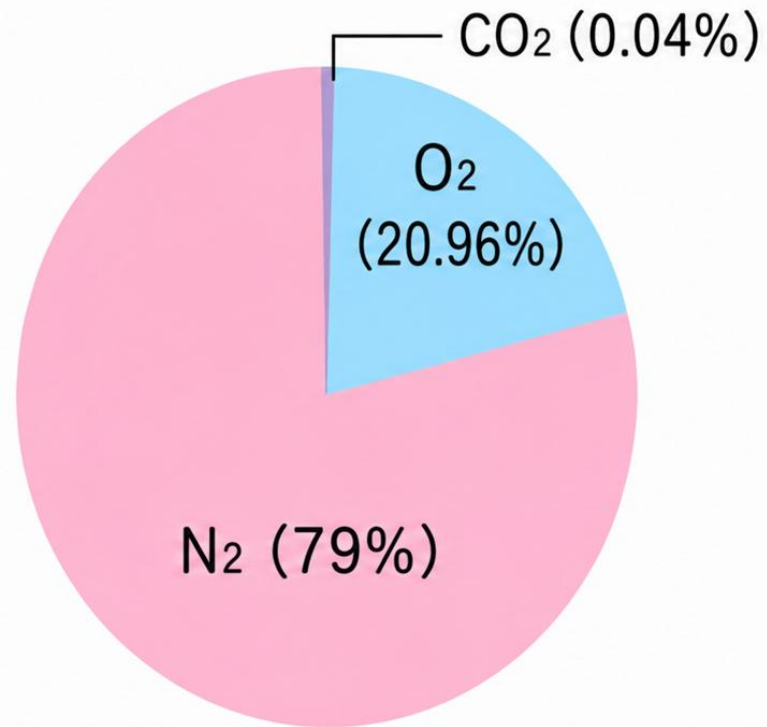
酸素飽和度の特徴

05

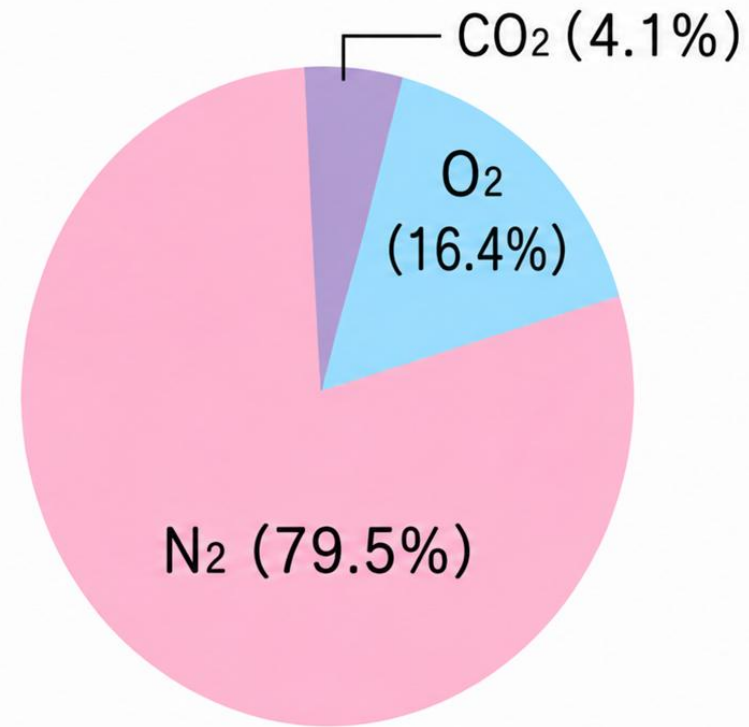
低酸素血症をきたす主な原因

吸気と呼気の組成

吸気 (大気)



呼気



ヒトは常に約**21%の酸素**を吸っている

外呼吸と内呼吸

外呼吸

「肺胞と血液の間」でのガス交換

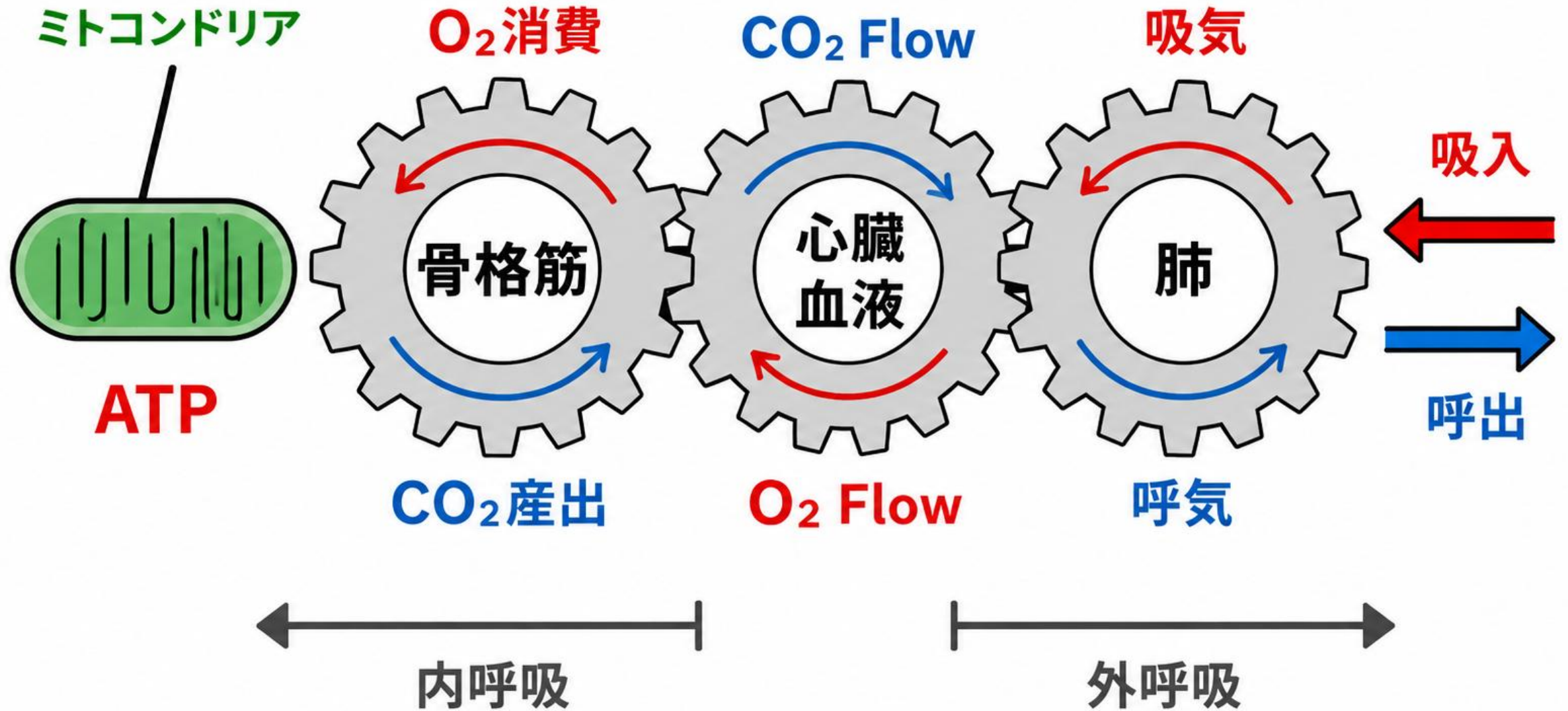


内呼吸

「組織細胞と血液の間」でのガス交換



ワッサーマンの歯車



吐く息となる
二酸化炭素

息を吸って
入ってきた酸素

- 二酸化炭素 (CO₂)
- 酸素 (O₂)

二酸化炭素は
肺胞の中へ移動

酸素は
体の中へ移動

二酸化炭素

酸素

体の細胞で使われたあとの
不要となった二酸化炭素が、
毛細血管から肺胞へ
取り込まれる

吸った空気の中に含まれる
酸素が、肺胞から毛細血管へ
取り込まれる



肺胞では、二酸化炭素は外へ出され、酸素は体の中へ取り込まれます。

本日の内容

01

外呼吸と内呼吸

02

ガス (O_2 ・ CO_2) の動き

03

呼吸の調節

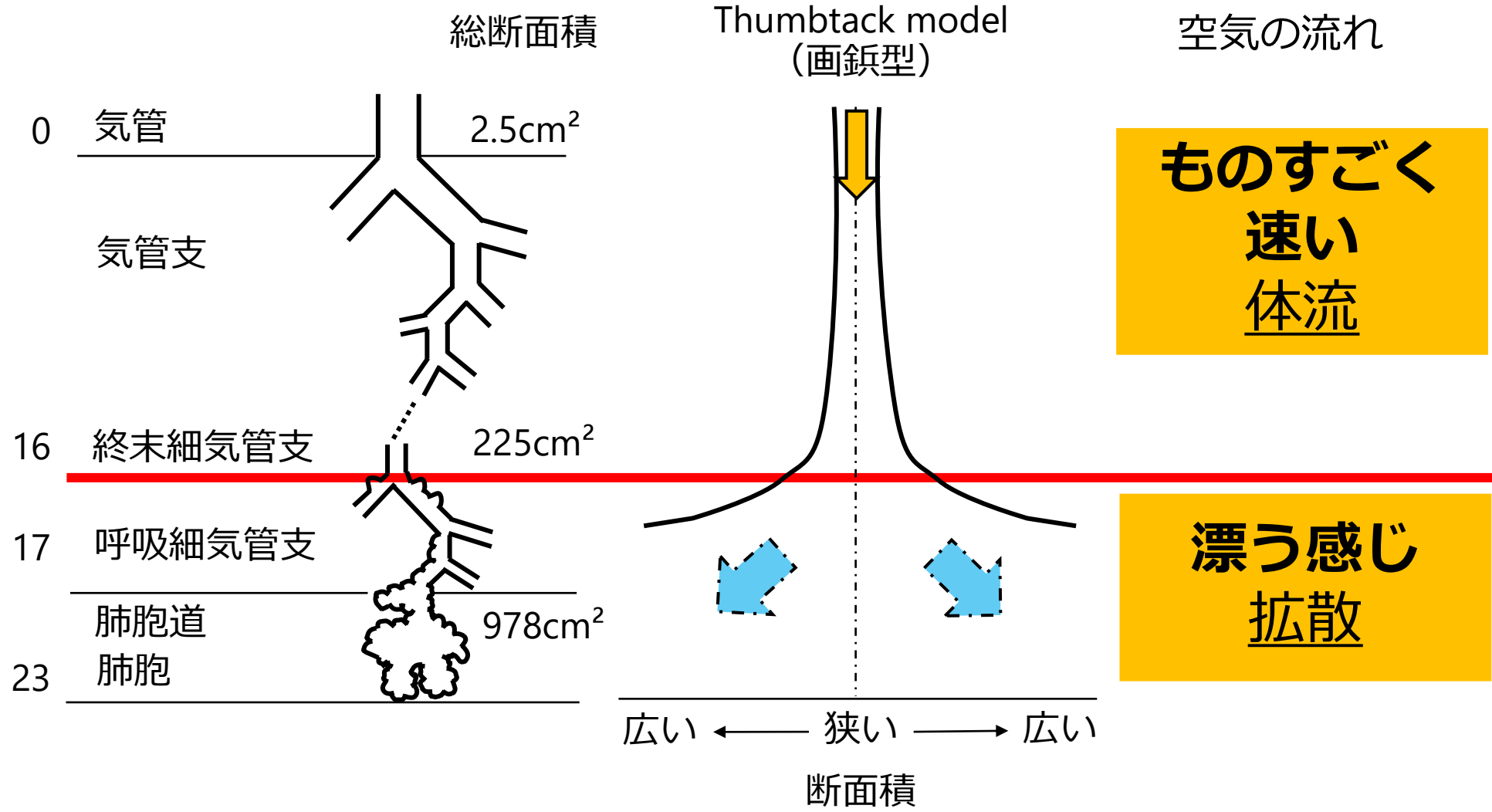
04

酸素飽和度の特徴

05

低酸素血症をきたす主な原因

気管から肺胞までの特徴



≡ 2.5ミクロン/秒の速さ ≡

2.5ミクロン/秒 = 1秒間に**0.0025mm**進む速さ

1秒間でどのくらい進む?



ミクロン (μm) はとても小さな長さの単位!
1ミクロン = **0.001mm** (= 1/1000mm)

身近なもの比べると… (1秒あたりの移動距離)

カタツムリが進む速さの例



カタツムリの歩く速さ
約0.75mm/分
1秒あたり約0.0125mm
その約1/5
= 約**0.0025mm (2.5 μm)**

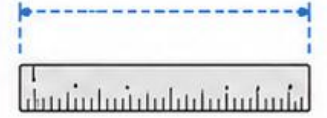
髪の毛の太さの約1/30



その約1/30
= 約**2.3 μm**

1mmの1/400

1mm

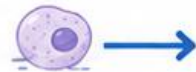


その1/400
= **2.5 μm**

時間がたつと
どのくらい進む?



1秒後



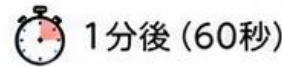
2.5 μm



10秒後



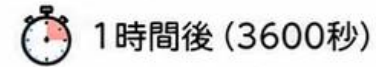
25 μm (0.025mm)



1分後 (60秒)



150 μm (0.15mm)



1時間後 (3600秒)



9,000 μm (9mm)

まとめ



2.5ミクロン/秒は、とてもゆっくりした速さですが、時間がたつと目に見える距離になります。体の中では、このような小さな移動の積み重ねが大切な働きを支えています。

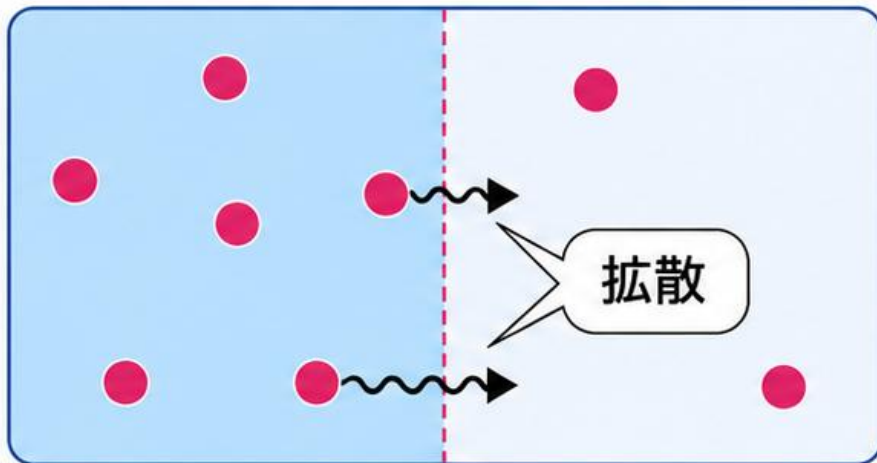


拡散とは

濃度の高い側から低い側へ、分子が自然に移動する現象

1 濃度差がある状態

高濃度

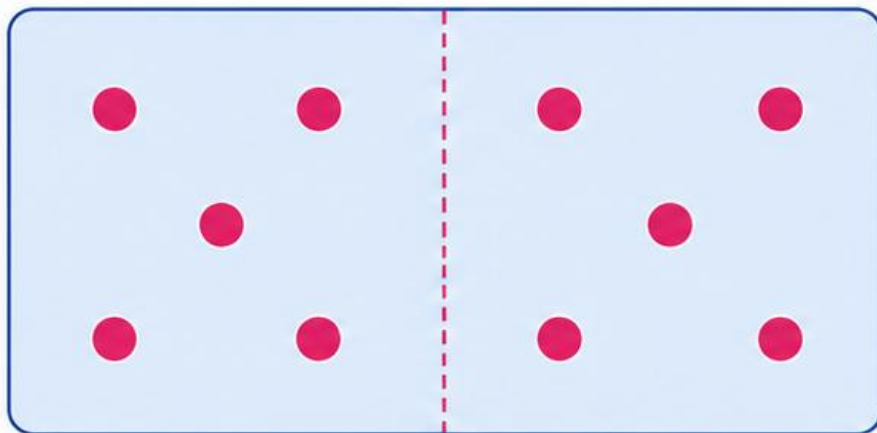


低濃度



濃度差があるため、
分子は**自然に移動**する

2 濃度が均一な状態



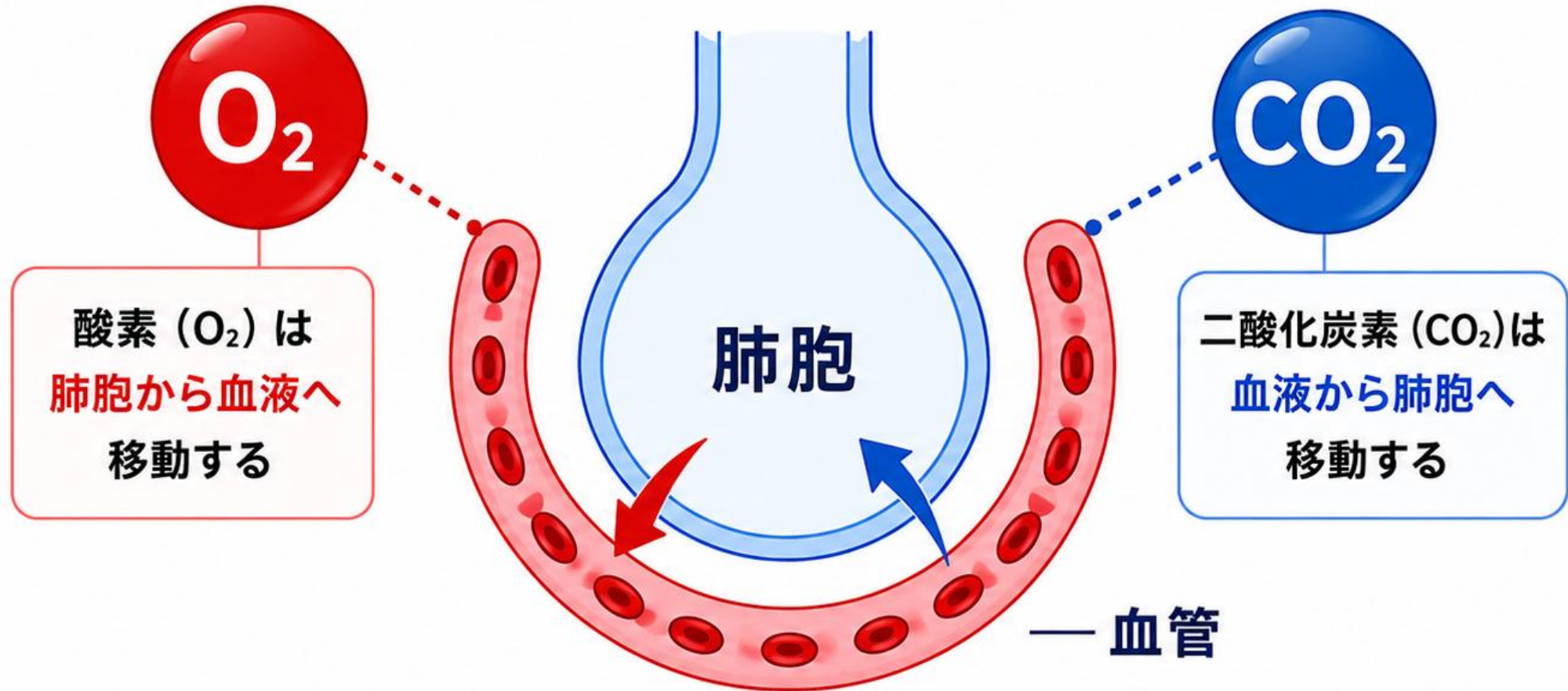
濃度が均一になると、
正味の移動は起こらない

➔ 拡散は**エネルギー**を使わず、**濃度差**だけで起こる自然な現象

● : 分子

--- : 膜 (分子が透過できる)

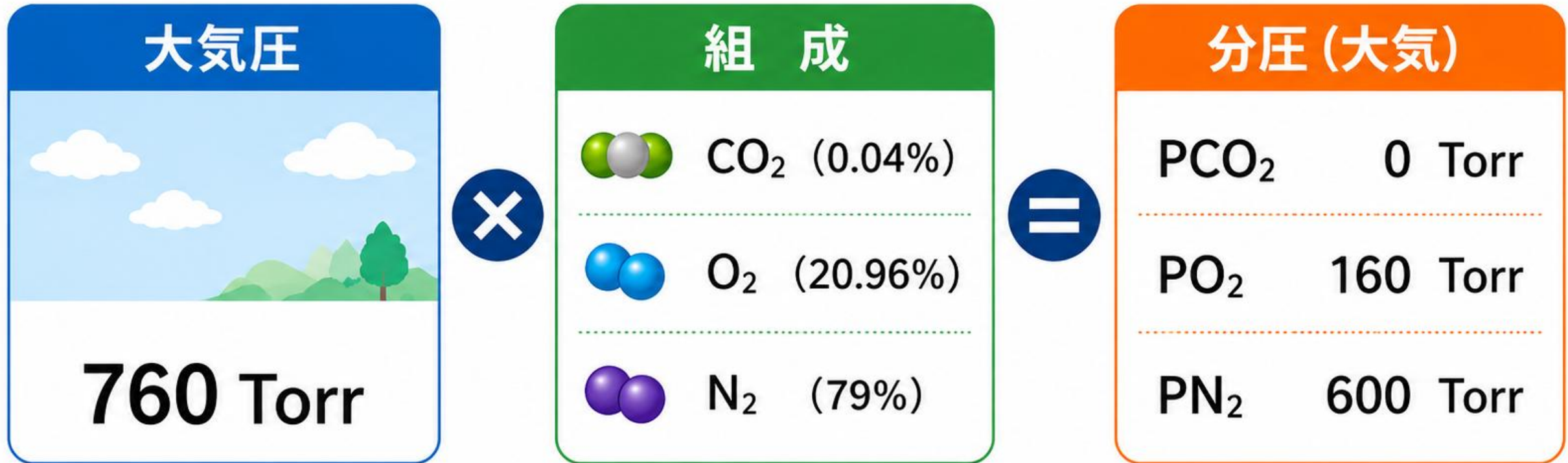
ガス交換は圧の高低の差（分圧）で動く



圧が高い方 → 圧が低い方に動く

分圧とは

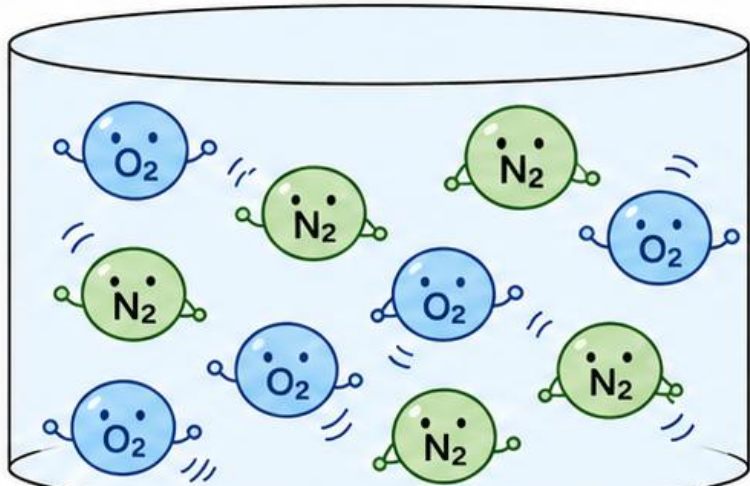
- N_2 、 O_2 、 CO_2 が混合したガスにおいて、それぞれの成分がもつ圧を分圧 (partial pressure) という。
- 記号は P 、単位は Torr (= mmHg) で表す。



分圧ってなに？

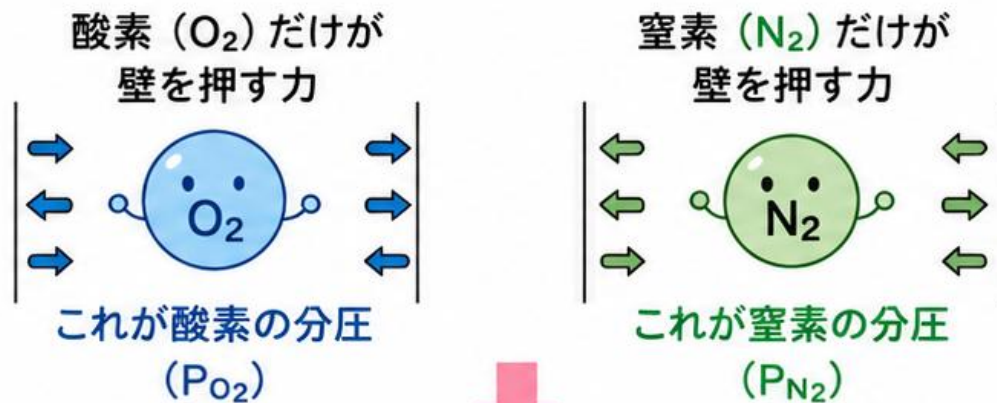
分圧とは、混ざり合っている気体の中で、それぞれの気体を示す“**圧力（押す力）**”のことです。

① 混ざり合った気体のイメージ



酸素 (O₂) や窒素 (N₂) などが
いっしょに入っている状態

② それぞれが壁を押す力 = 分圧



全体の圧力 = $P_{O_2} + P_{N_2} + \dots$
(それぞれの分圧の合計が全体の圧力になる)

たとえば (大気の場合)

全体の圧力が **760mmHg** のとき…

酸素の分圧 (P_{O₂})
約 159mmHg (約21%)

+

窒素の分圧 (P_{N₂})
約 596mmHg (約78%)

+

その他の気体の分圧
約 5mmHg (約1%)

= **760mmHg**
(全体の圧力)

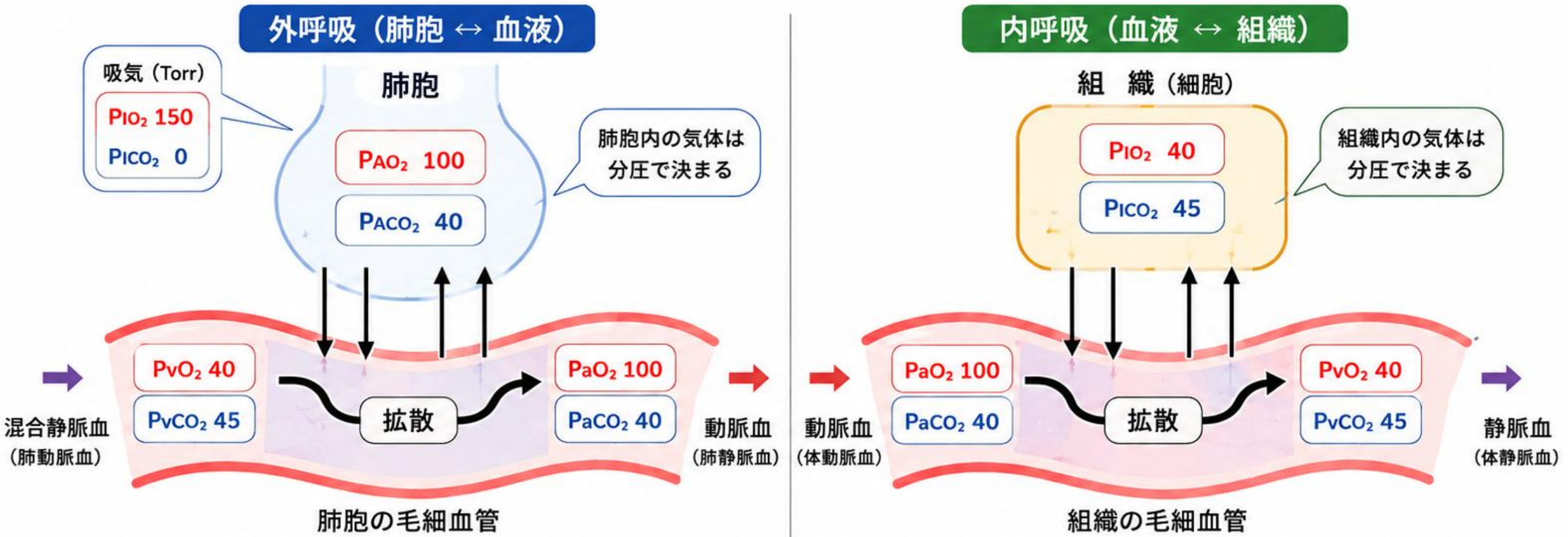
それぞれが少しずつ
壁を押しているから、
全体の圧力になるよ!



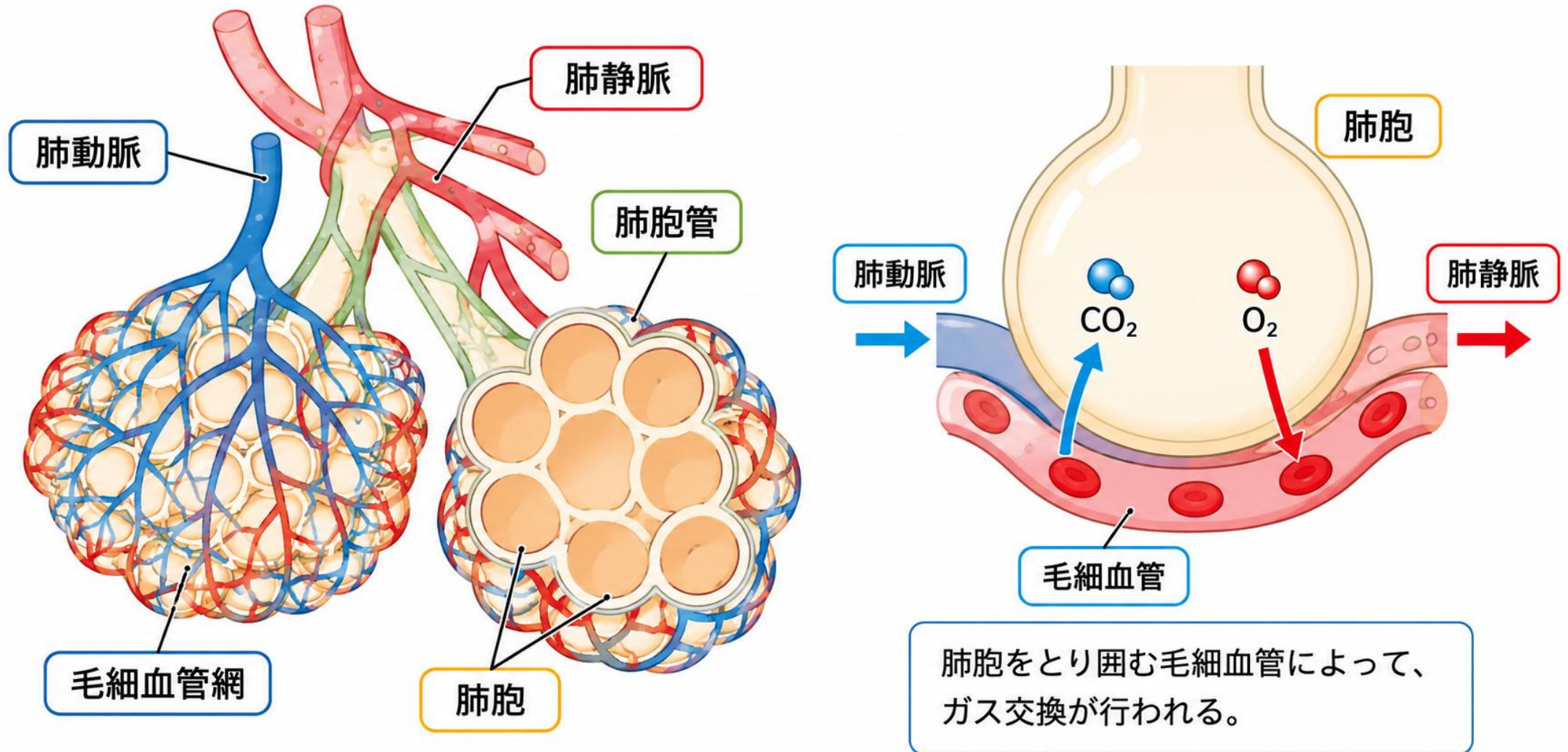
★ **ポイント**：血液中の酸素は、この「**P_{O₂} (酸素分圧)**」の差を利用して、肺から体の中へ取り込まれます。

O₂とCO₂は分圧格差による拡散で移動している

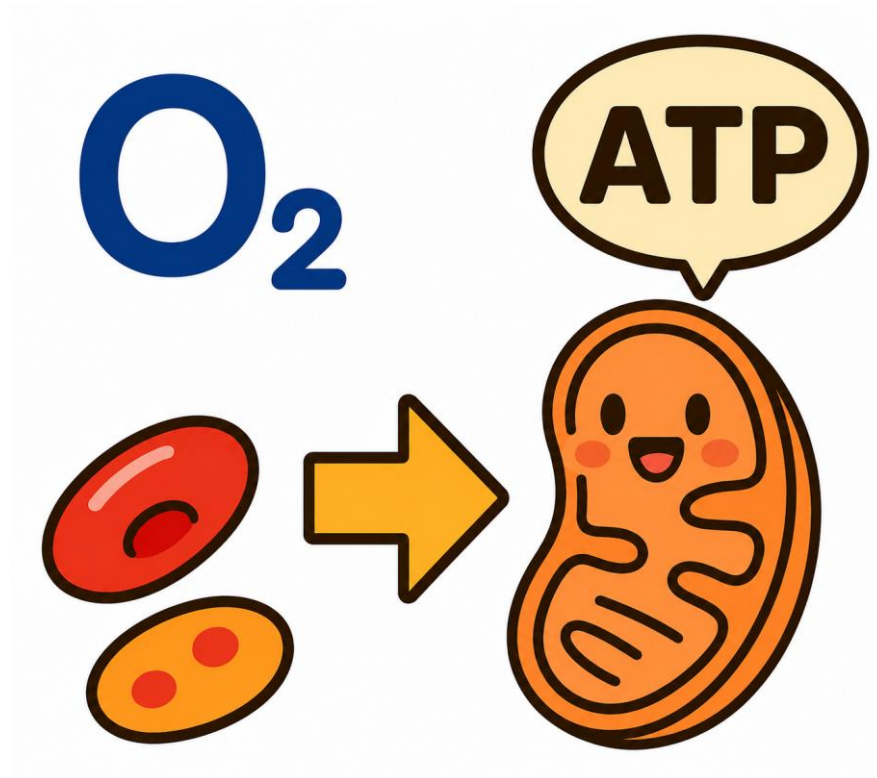
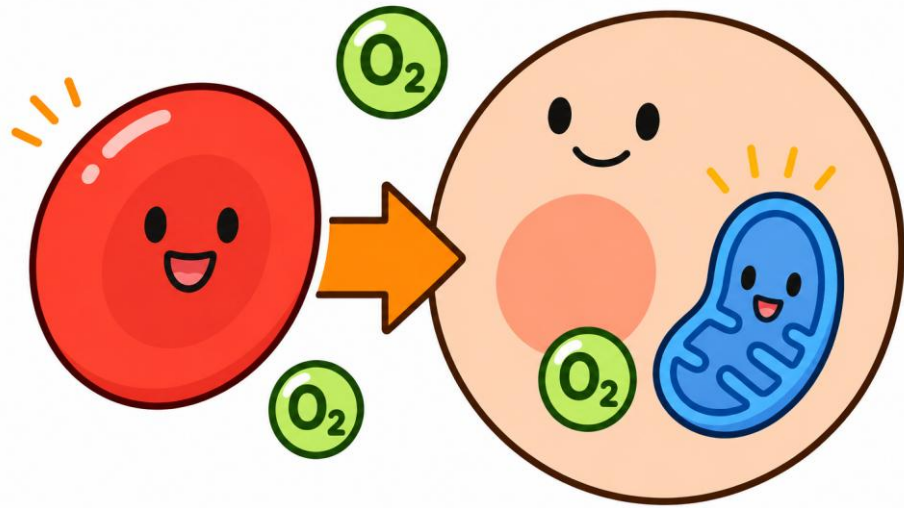
気体は、**高い分圧**から**低い分圧**へと移動する（分圧格差による拡散）



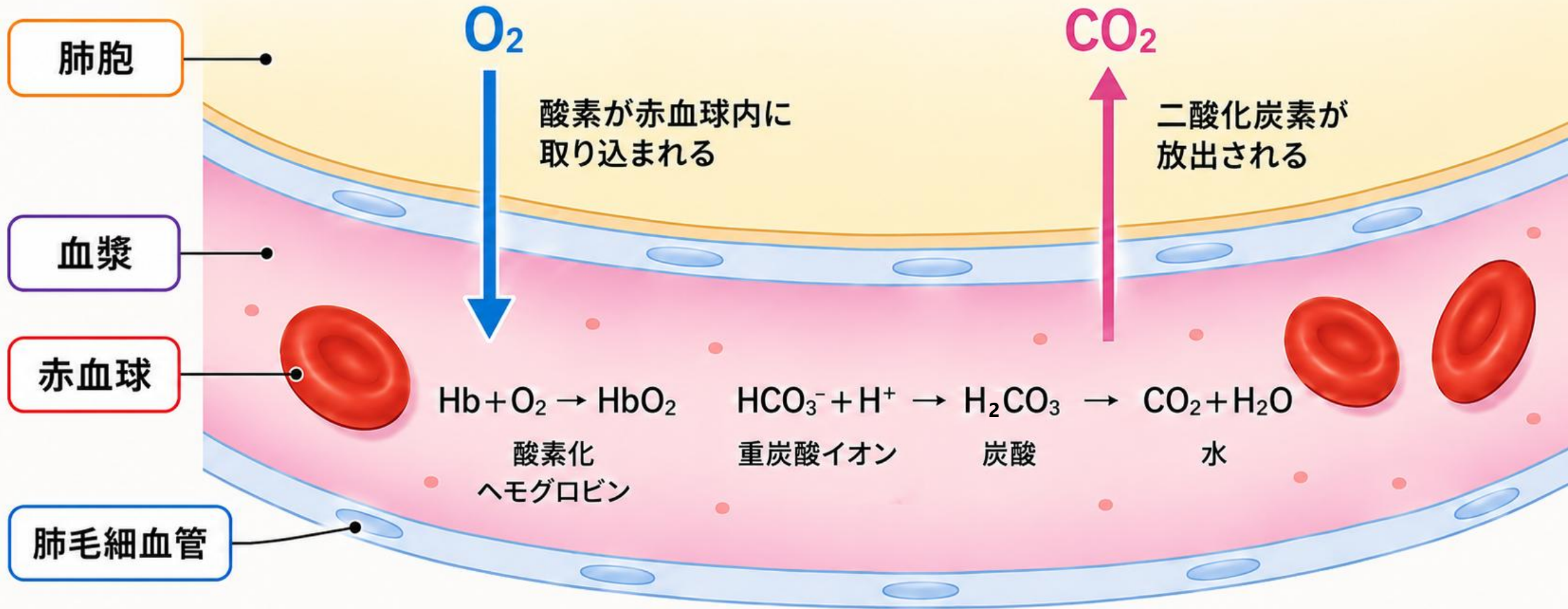
「肺胞」と「血管」での外呼吸が可能になり



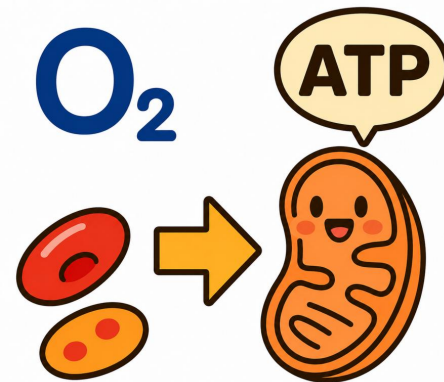
「血管」と「組織」での内呼吸が可能になる



肺胞内でのガス交換

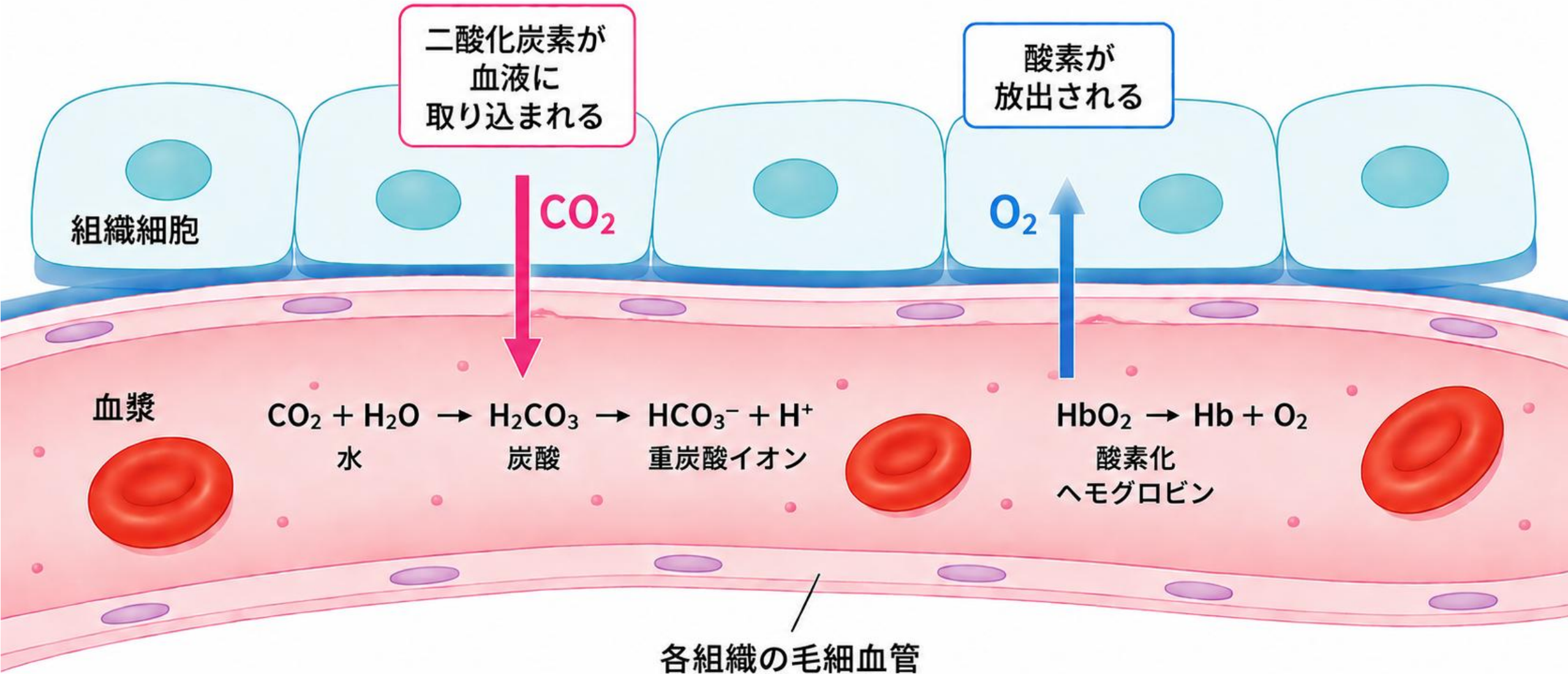


化学反応式（ブドウ糖を例に）

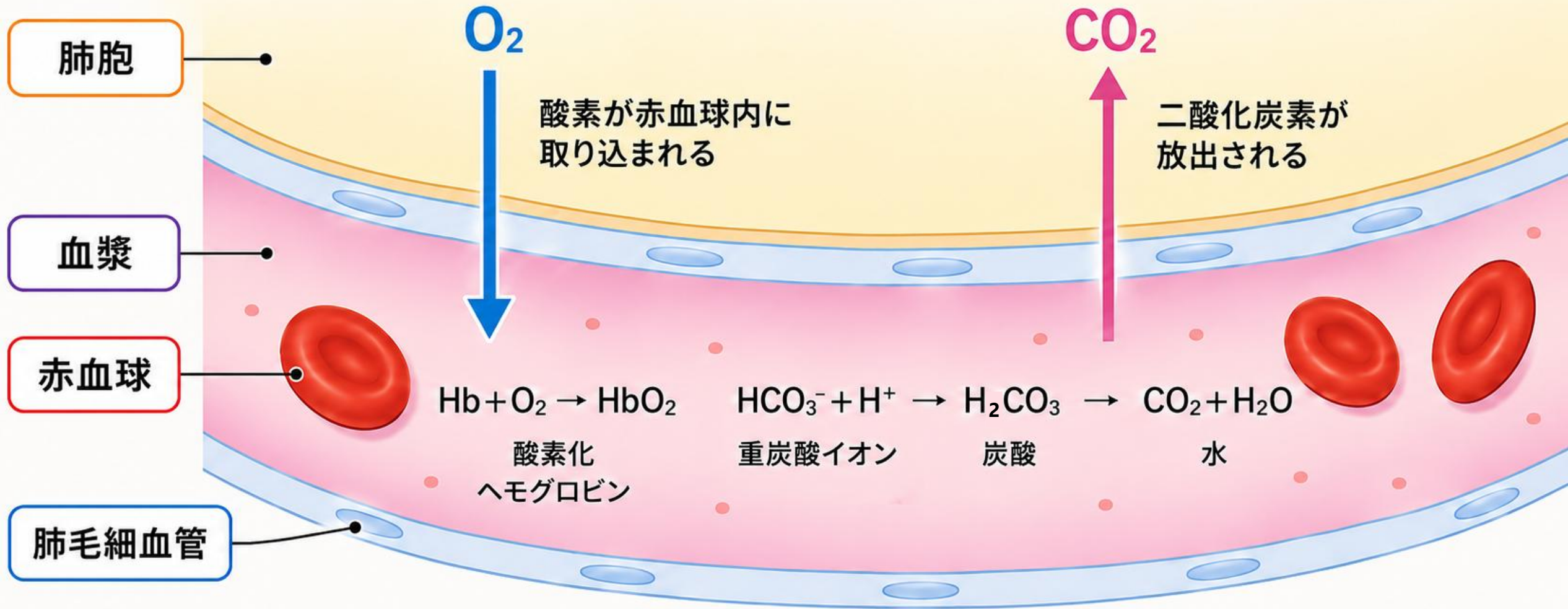


ブドウ糖と酸素が反応して、水・二酸化炭素・エネルギー（ATP）がつくられます。

組織内でのガス交換



肺胞内でのガス交換



pHは H^+ の濃度を表す

- 血中（動脈血）に存在する H^+ は、他のイオンと比較して極めて低い濃度しか存在しない。

Na^+ : 135~149 mEq/L

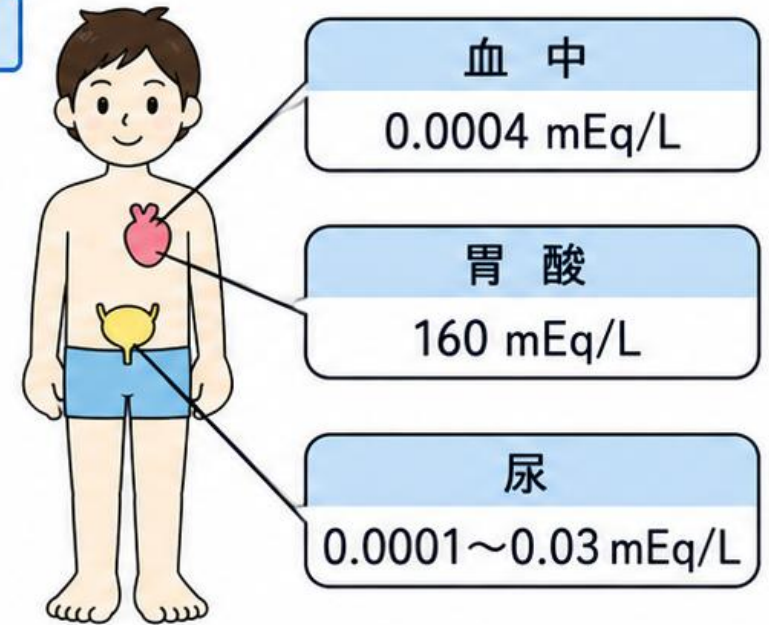
K^+ : 3.5~4.9 mEq/L

Cl^- : 96~108 mEq/L

H^+ : 0.00036~
0.00045 mEq/L

- また H^+ 濃度は血中、胃酸、尿で大きく変化する。
- 特に胃酸の H^+ 濃度は血中の H^+ 濃度の400万倍である。

体内の H^+ 濃度

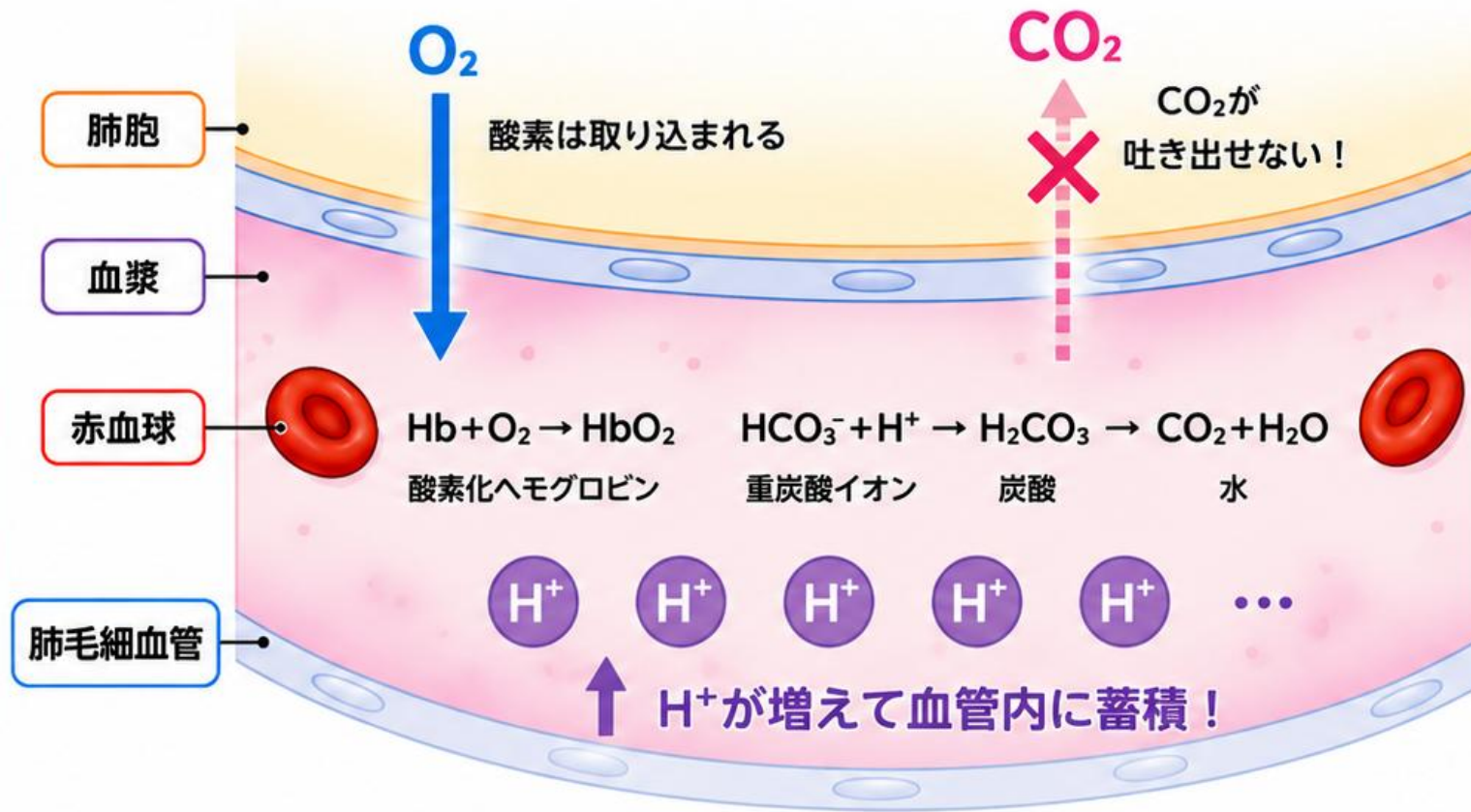


生体内の H^+ の濃度は非常に小さく、変化幅も著しく大きいため、**pH**という単位で表している。

CO₂が吐き出せないとH⁺が血管内に蓄積する

CO₂が吐き出せない状態

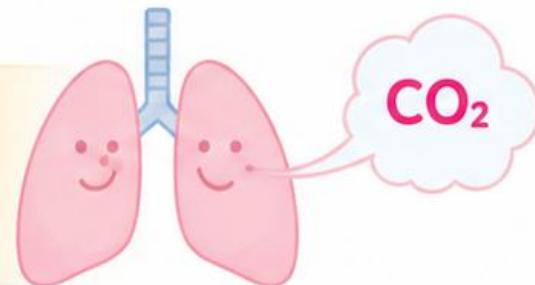
CO₂が肺から排出されないため、
反応が右に進み、H⁺が増加。
血管内にH⁺が蓄積し、
血液は酸性に傾く
(アシドーシス)。



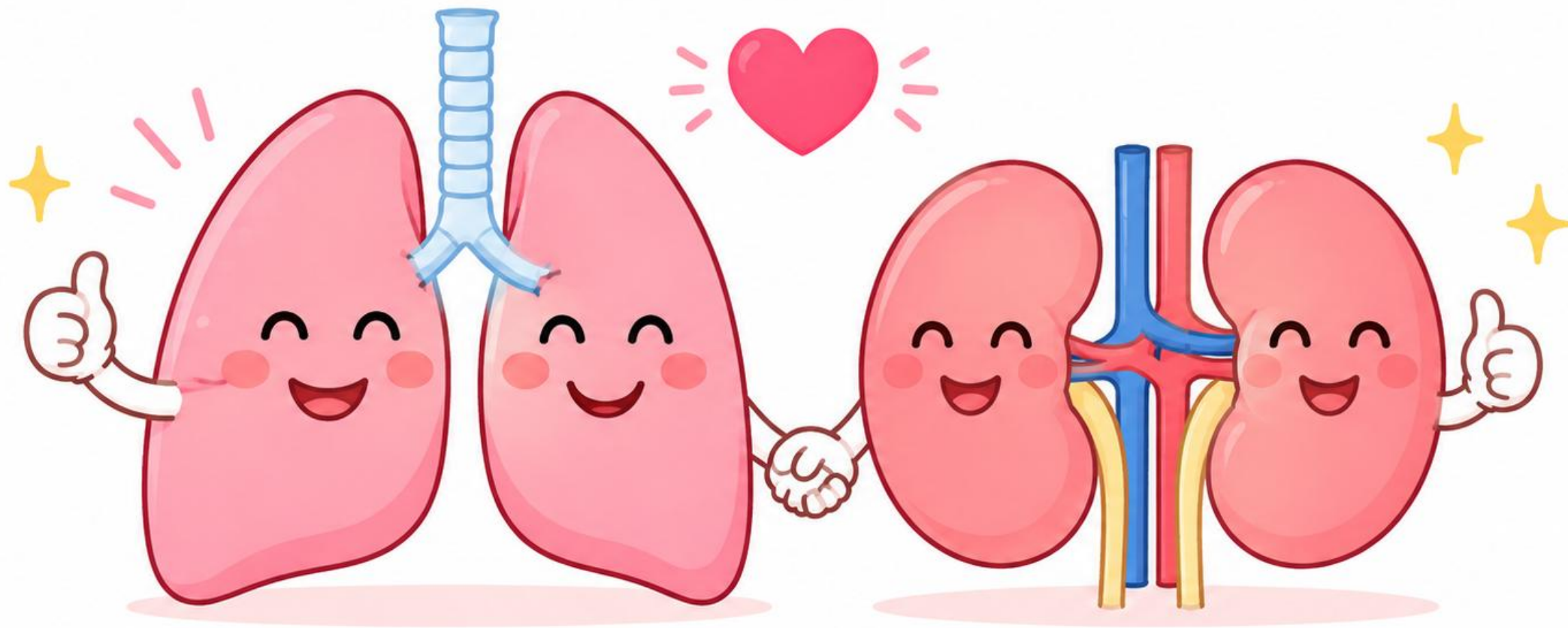
CO₂が排出されない、
H⁺が増え続け、
血管内に蓄積してしまう。
→ 血液が酸性に傾く
(アシドーシス)



CO₂の排出がうまくいかないと、体は酸性に傾きます。
適切にCO₂を吐き出すことが、体のpHバランスを保つためにとても大切です。



≡ 肺と腎臓は重要なパートナー関係 ≡



肺は体に**酸素**を届け、腎臓は体の**バランス**を整える。
おたがいに支え合って、健康な体を守っています！

本日の内容

01 外呼吸と内呼吸

02 ガス ($O_2 \cdot CO_2$) の動き

03 呼吸の調節

04 酸素飽和度の特徴

05 低酸素血症をきたす主な原因

呼吸の調節と神経

行動性調節

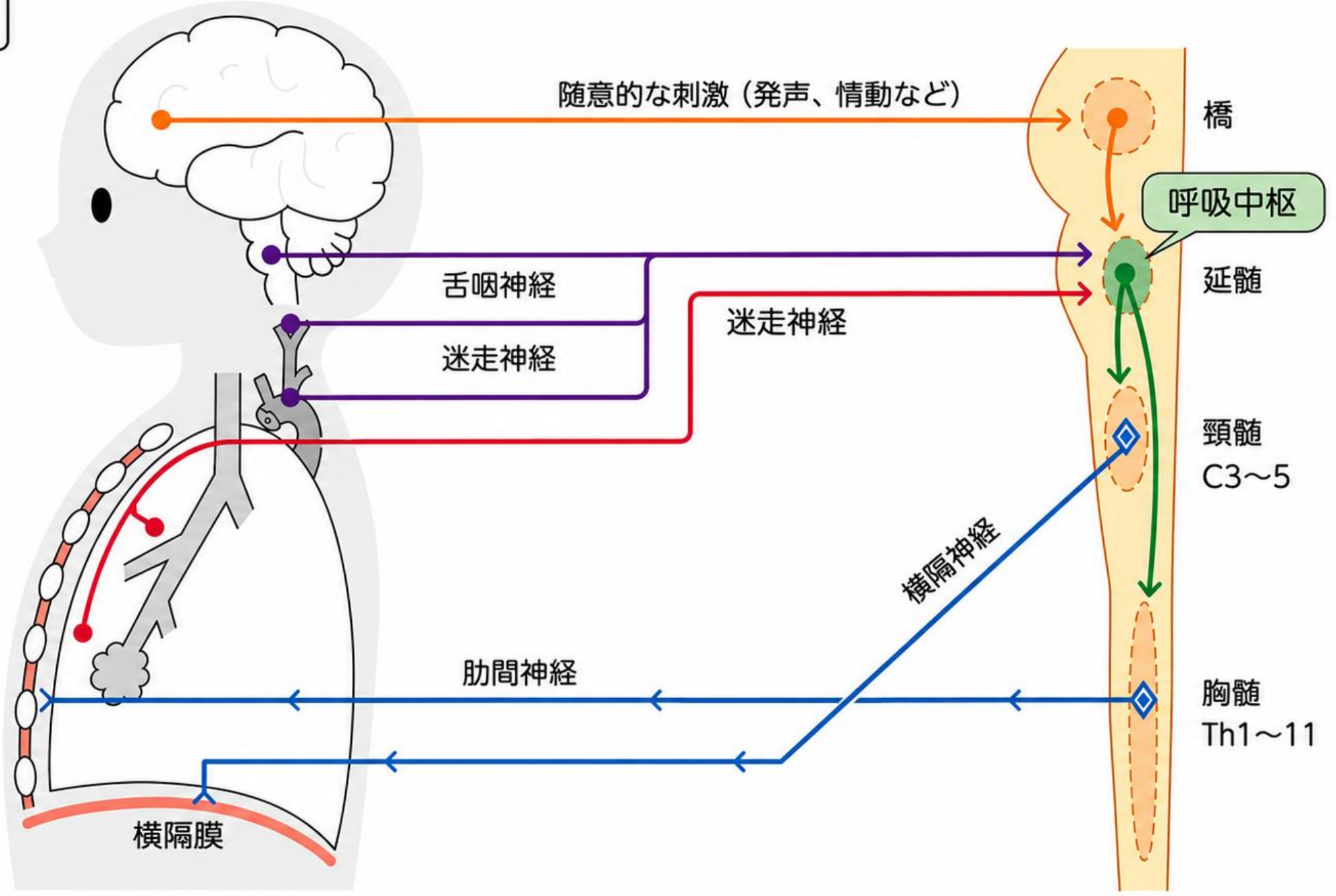
大脳皮質

化学的調節

化学受容体

神経性調節

伸展受容体



随意的な調節と不随意的な調節

- 呼吸の調節には随意的な調節と不随意的(自律的)な調節があり、普段の呼吸は不随意的な調節によってコントロールされている。

呼吸調節の種類		刺激となるもの	関与する受容体・神経				
随意	① 行動性調節	<ul style="list-style-type: none"> • 発声, 会話 • 情動, 興奮 など 	大脳皮質, 視床下部	→ 橋			
不随意 (自律的)	② 化学的調節	<ul style="list-style-type: none"> • 体内の CO₂ の増加, O₂ の減少, pH の低下 など 	化学受容体		延髄の呼吸中枢	運動ニューロン	呼吸筋 (横隔膜, 内・外肋間筋)
	③ 神経性調節 (反射)	<ul style="list-style-type: none"> • 肺の膨張 など 	伸展受容体				

① 行動性調節：意識的な行動や感情などによって呼吸を調節するしくみ(例：話す, 笑う, 歌うなど)

② 化学的調節：血液中の CO₂, O₂, pH などの化学的变化を感知して呼吸を調節するしくみ

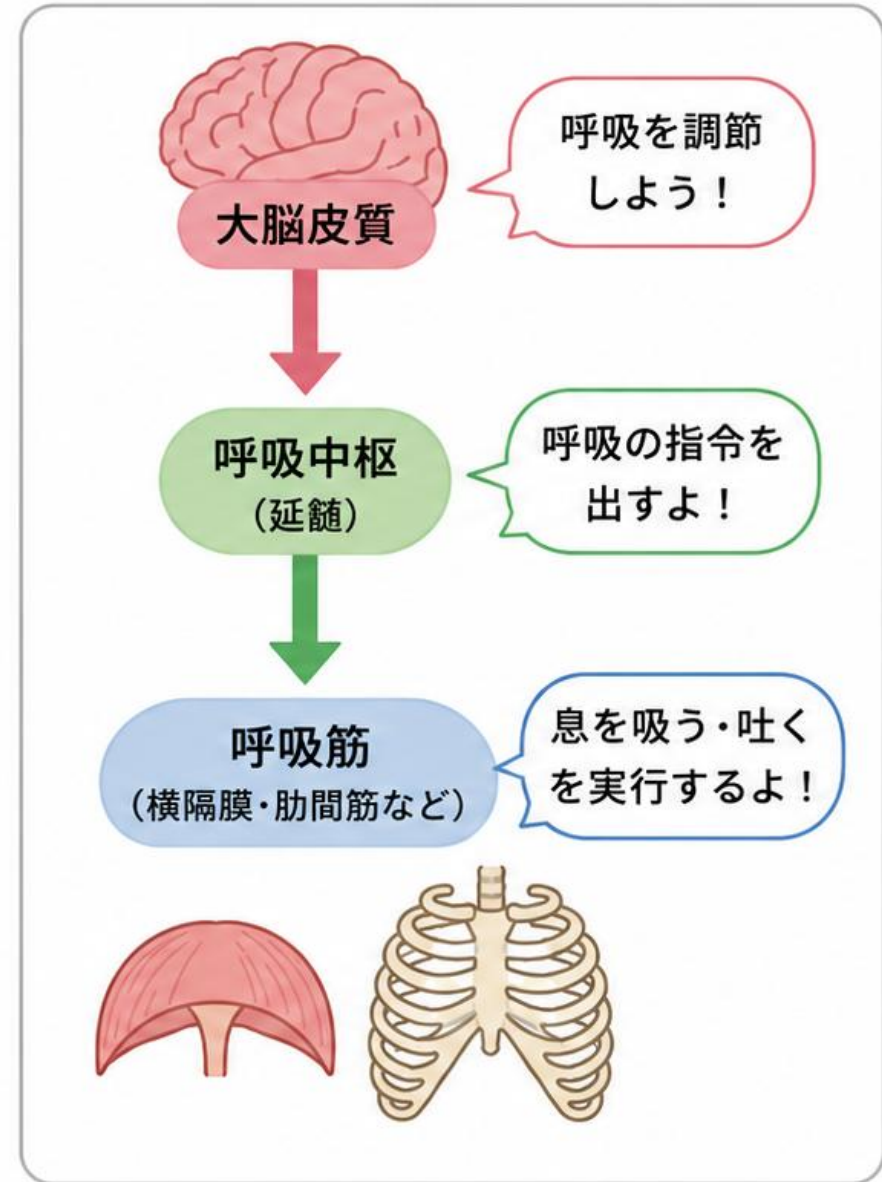
③ 神経性調節(反射)：肺の伸展などの物理的的刺激を感知して反射的に呼吸を調節するしくみ



普段の安静時の呼吸は、②と③の不随意的な調節によって自動的に調整されています。

大脳皮質による呼吸調節は随意的に調節できる

- 呼吸は無意識(不随意)に行われているが、意識的に呼吸の速度や深さを変えることもできる。
意識的(随意的)呼吸を司っているのは
大脳皮質である。

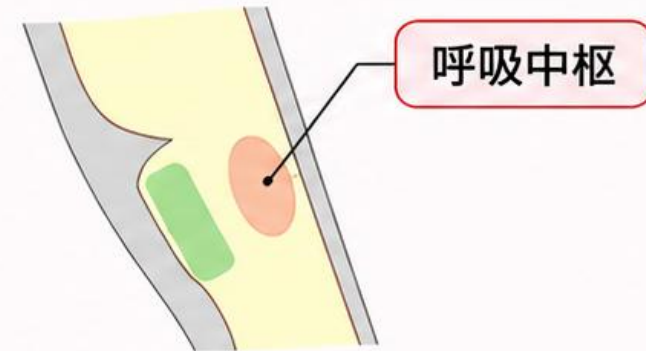


普段は無意識に呼吸しているけれど、意識すれば自分の呼吸をコントロールすることができる!

化学的調節

中枢化学
受容体

延髄に存在し
PaCO₂の上昇 (pHの低下)を感知



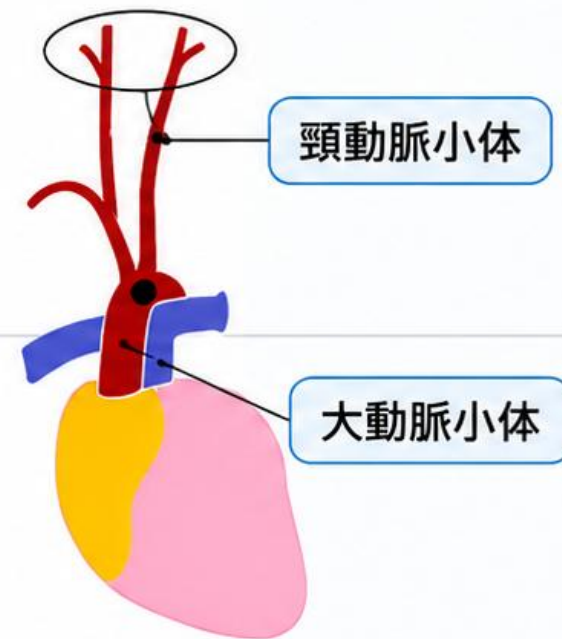
末梢化学受容体

小体
頸動脈

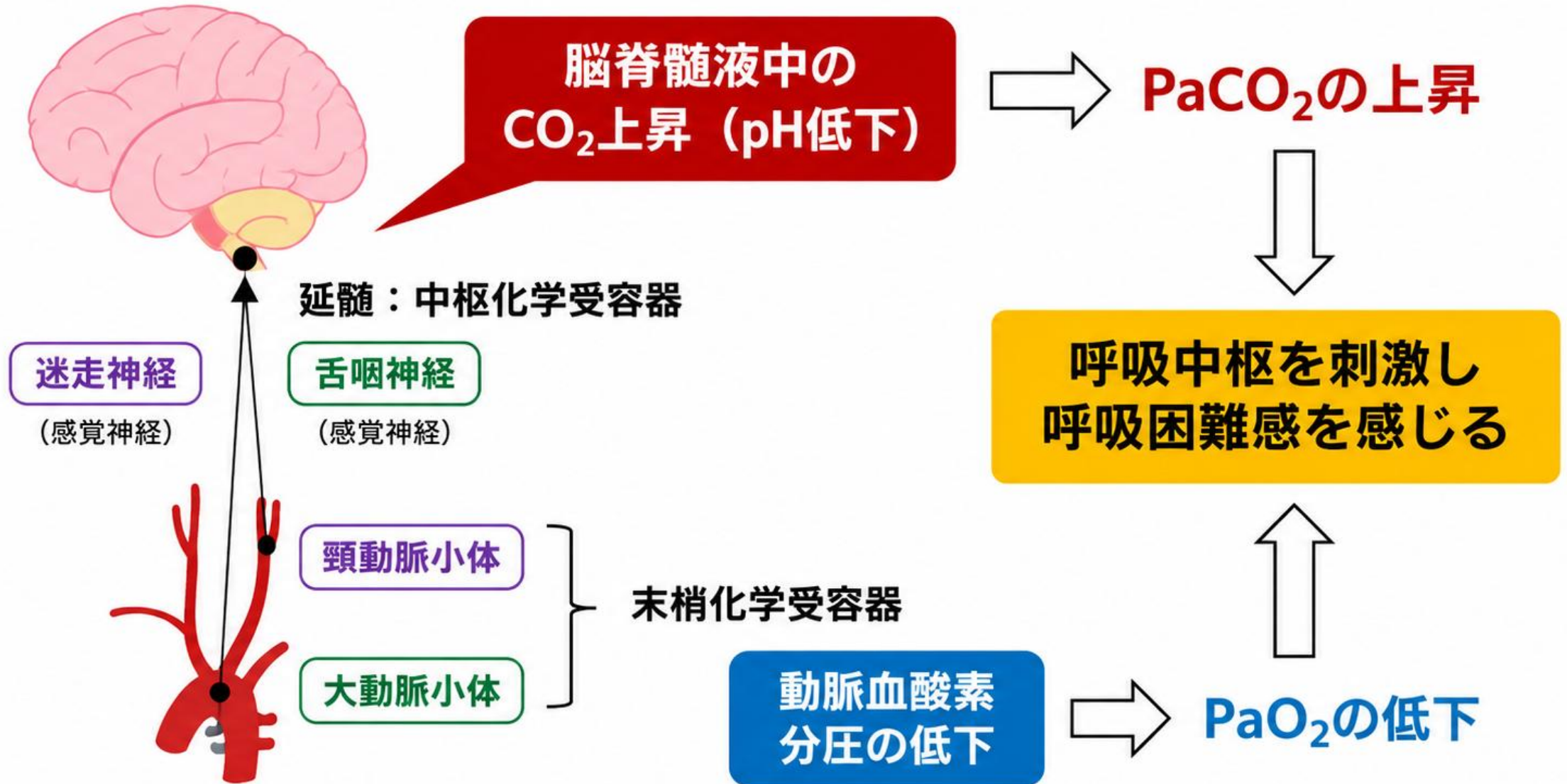
内・外頸動脈に分岐する部分に存在し、**PaO₂の低下**を感知

小体
大動脈

大動脈弓に存在し、**PaO₂の低下**を感知



呼吸困難感を感じる道筋 モーターコマンドセオリー



$O_2 \cdot CO_2$ と呼吸困難

O_2

苦しいのは5~30分
急性期の患者に多い

CO_2

ずっと苦しい
慢性的な苦しさは高炭酸ガス
血症が多い

神経性調節

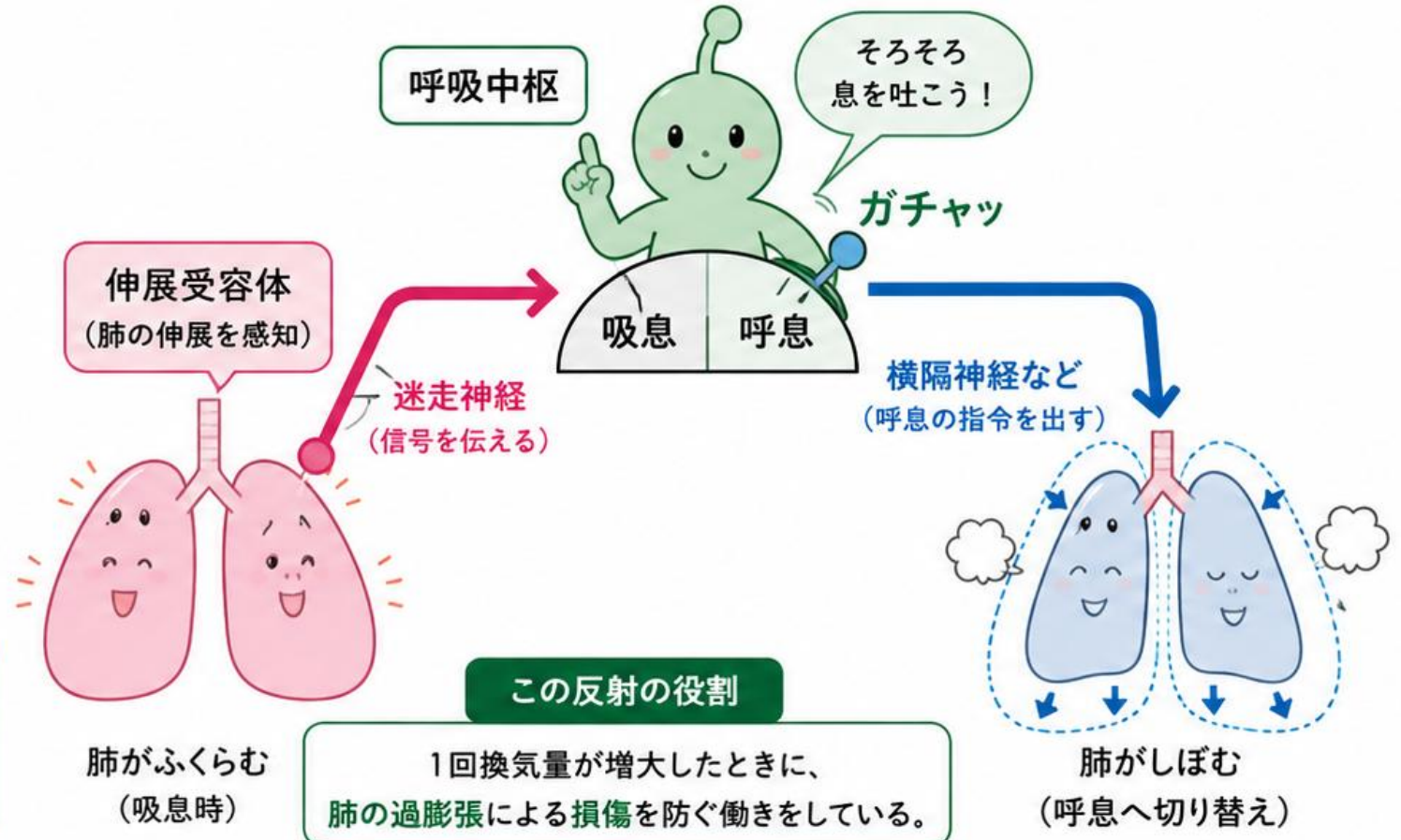
- 下気道や肺には、肺の伸展を感知する**伸展受容体**が存在する。伸展受容体は、肺の膨張を感知すると**迷走神経**を介して吸息を抑制している。
- このように、気道壁の伸展変化によって吸息活動を抑制し、呼息への切り替えを行う反射を**ヘーリング-ブロイエル反射**とよぶ。
- この反射は、1回換気量が増大したときに肺の過膨張による損傷を防ぐ働きをしている。

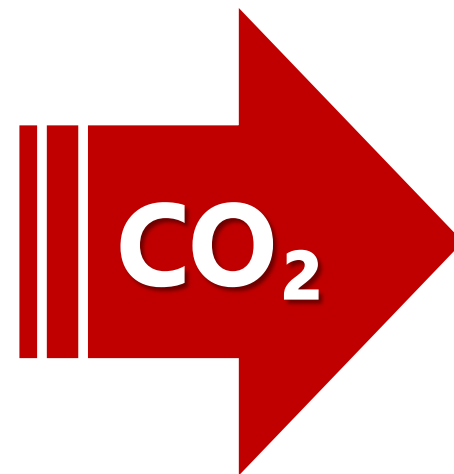
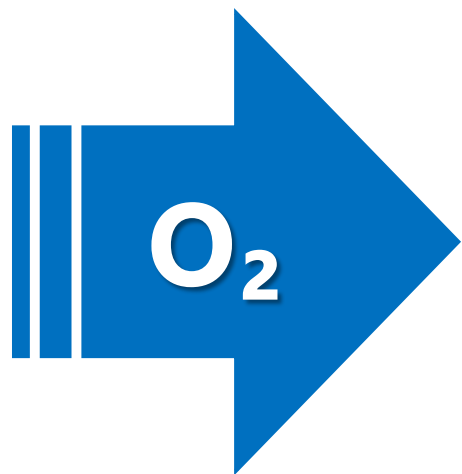


伸展受容体が**肺の膨張**を感知すると、**迷走神経**を介して**呼吸中枢**に信号が伝わり、吸息が抑えられて呼息に切り替わります。

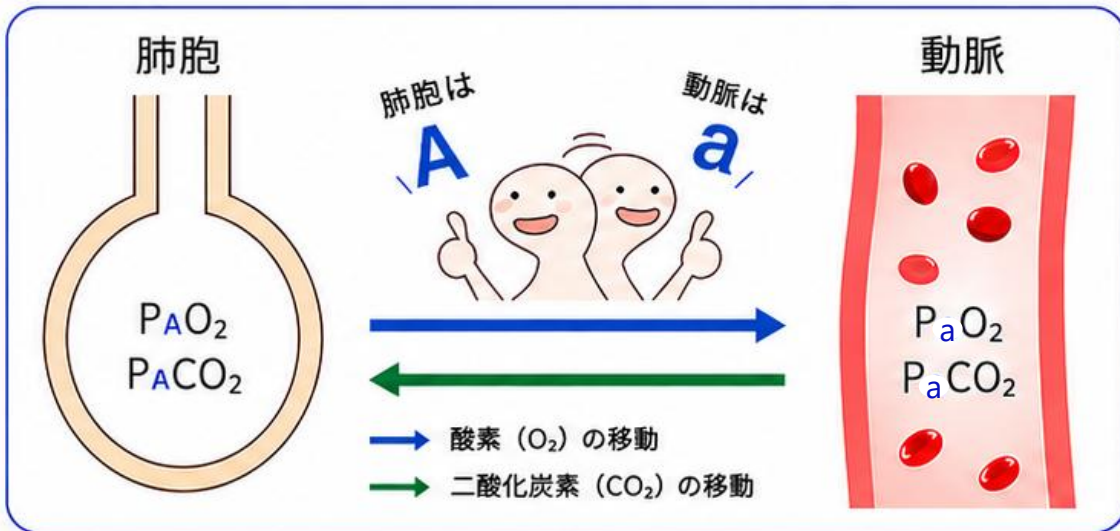
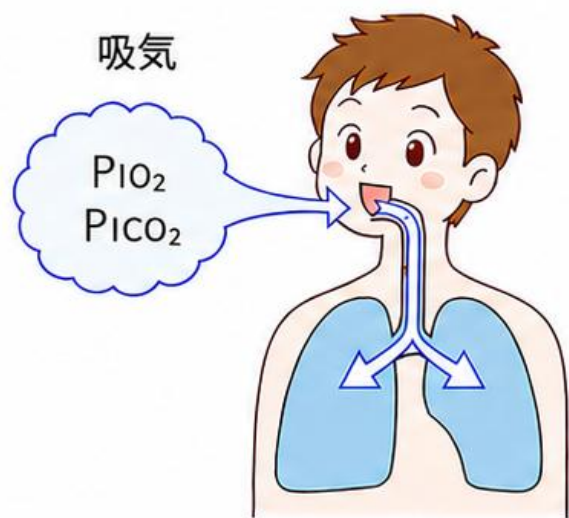
ヘーリング-ブロイエル反射のイメージ

- ヘーリング-ブロイエル反射は呼吸のスイッチを**吸息から呼息へ**切り替えているといえる。





ここまで、「 O_2 」と「 CO_2 」という言葉で説明してきましたが..



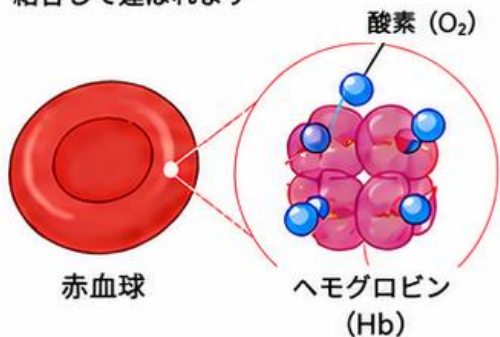
- $P_{I}O_2$: 吸入気の酸素分圧
- $P_{I}CO_2$: 吸入気のコ二酸化炭素分圧

- $P_{A}O_2$: 肺泡気の酸素分圧
- $P_{A}CO_2$: 肺泡気のコ二酸化炭素分圧

- $P_{a}O_2$: 動脈血の酸素分圧
- $P_{a}CO_2$: 動脈血のコ二酸化炭素分圧

Hbと酸素の結合

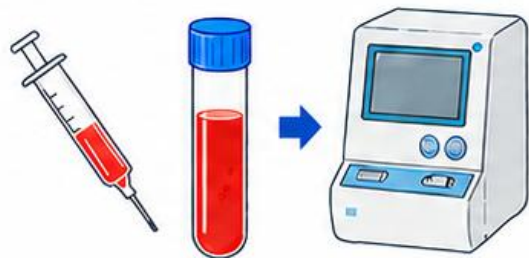
酸素は赤血球内のヘモグロビン (Hb) に結合して運ばれます



Hbに結合した酸素の割合を「酸素飽和度」といいます

直接動脈血で測定：SaO₂ (実測値)

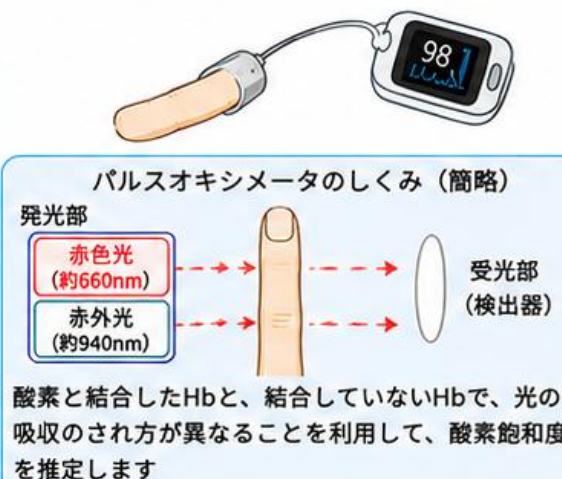
動脈血を採血し、血液ガス分析装置で測定します



SaO_2 = 血液中のヘモグロビンに結合している酸素の割合 (血液ガス分析 (ABG) で測定)

指で測定：SpO₂ (推定値)

指先などにセンサーを装着し、皮膚を透過する光を利用して酸素飽和度を推定します



SaO₂ と SpO₂ の関係

$$SaO_2 \doteq SpO_2$$

多くの場合、よく一致しますが、以下のような場合は乖離することがあります

- ・循環不良 (末梢血流の低下)
- ・体動がある場合
- ・マニキュアやジェルネイル
- ・強い光の影響 など

SpO₂は簡便で連続的に測定できるため、患者さんのモニタリングに非常に有用です。



まとめ

肺泡で酸素 (O₂) が取り込まれ、血液中に移動 (P_AO₂)

酸素はヘモグロビンと結合し、全身へ運ばれる (酸素飽和度)

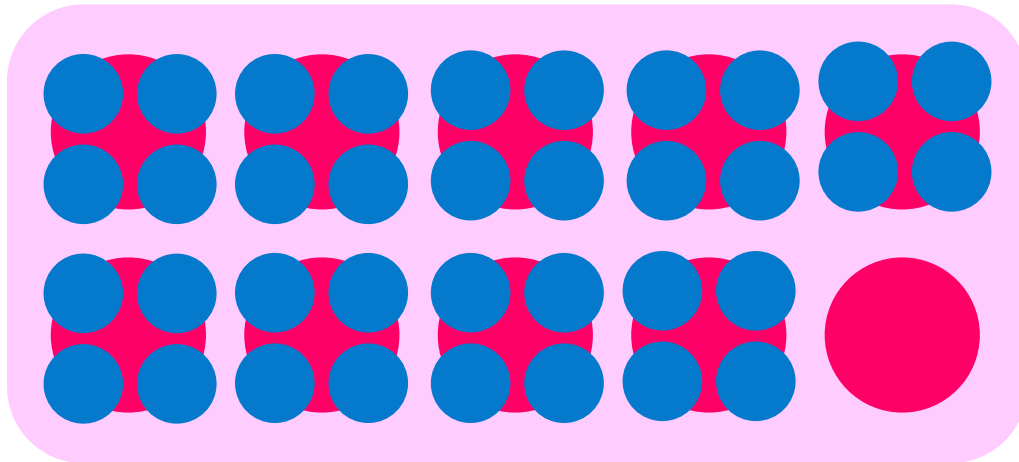
直接動脈血で測定するのが SaO₂ (実測値)

指で測定するのが SpO₂ (推定値)

$SaO_2 \doteq SpO_2$ (ただし、乖離することもある)

酸素飽和度 (%)

図 : SpO₂=90%



● : ヘモグロビン ● : 酸素

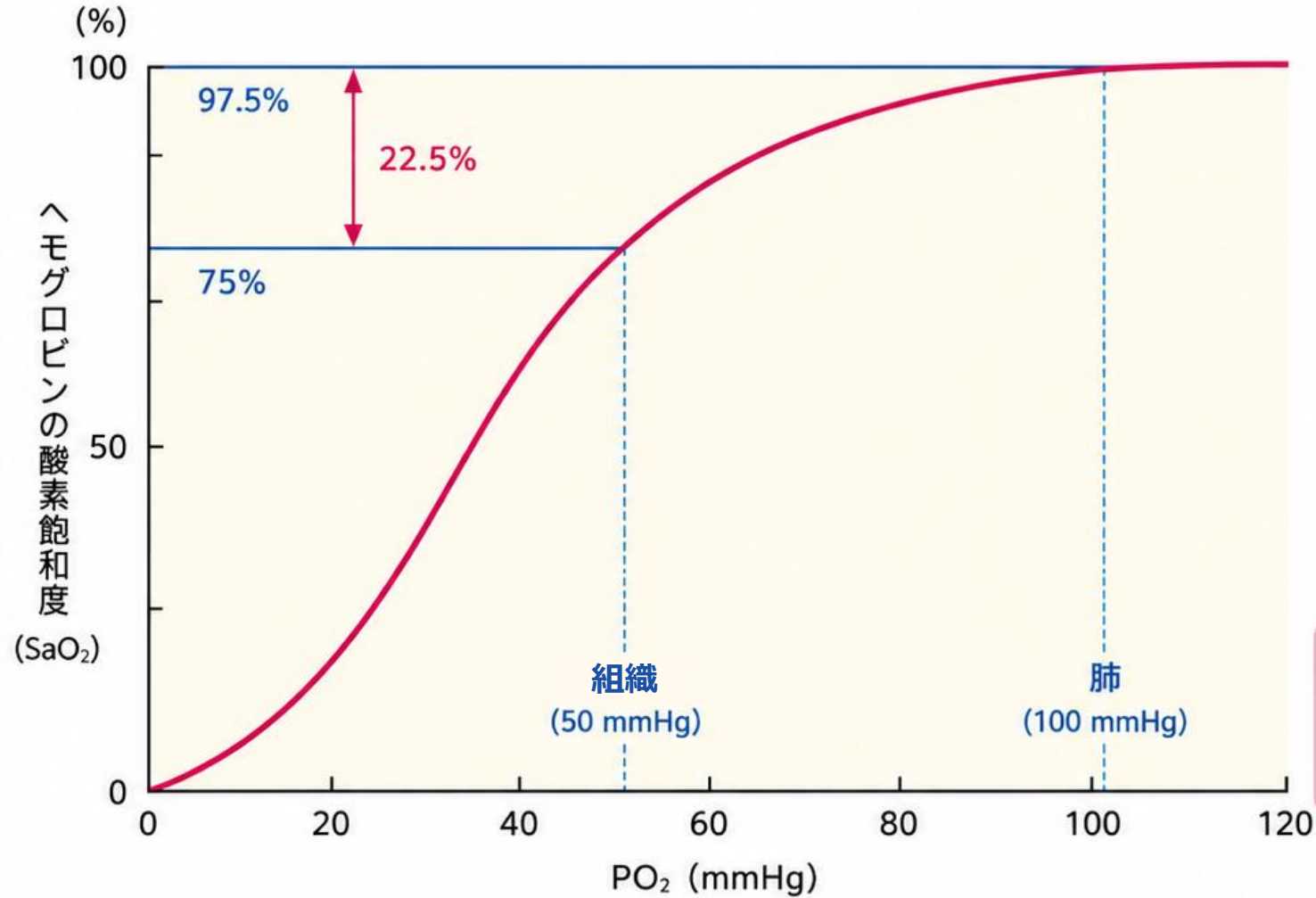
酸素がどれだけ
ヘモグロビンに結合
しているかを
%で表したもの

本日の内容

- 01 外呼吸と内呼吸
- 02 ガス ($O_2 \cdot CO_2$) の動き
- 03 呼吸の調節
- 04 酸素飽和度の特徴**
- 05 低酸素血症をきたす主な原因

酸素解離曲線

PO₂の上昇に伴い、ヘモグロビンの酸素飽和度 (SaO₂) が上昇する (S字カーブ)



末梢組織 (PO₂ = 50 mmHg)
酸素飽和度：約75%



組織で酸素が放出され、
ヘモグロビンの約22.5%が
解離する

肺 (PO₂ = 100 mmHg)
酸素飽和度：約97.5%

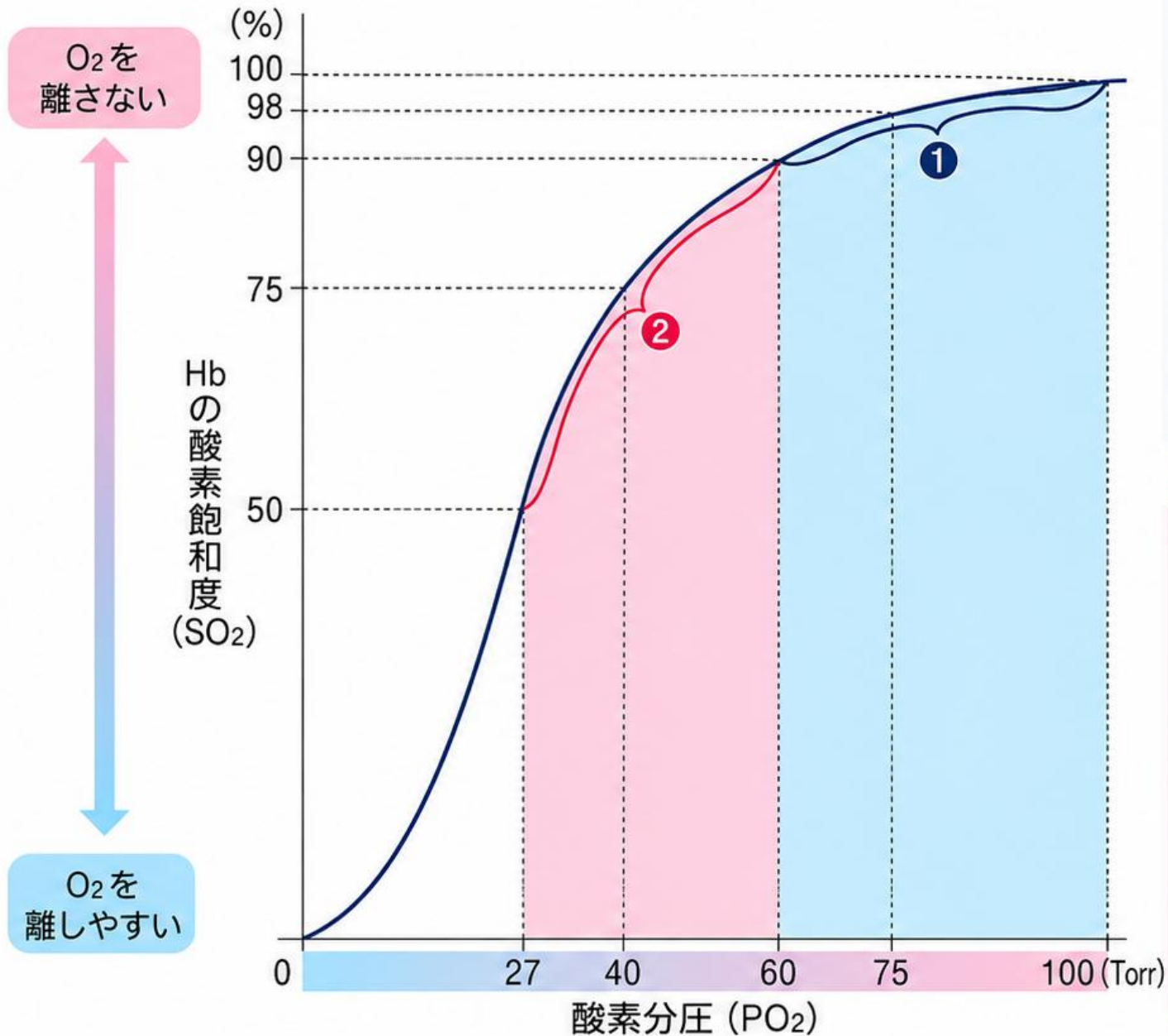


肺で酸素が結合し、
ヘモグロビンは**ほぼ**
飽和状態になる

● 22.5%の酸素が放出される
肺で取り込んだ酸素の約22.5%が
末梢組織へ供給される



S字カーブの性質により、肺では酸素を効率よく取り込み、末梢では酸素を効率よく放出できる



① 酸素分圧の高い領域

100Torr → -25Torr → 75Torr



SO₂ 98% → -3% → 95%

- 酸素分圧の高い領域では分圧が低下しても、HbはO₂を離しにくい。
- このため、Hbは酸素分圧の低い領域まで多くのO₂を運搬することができる。

② 酸素分圧の低い領域 (組織など)

60Torr → -20Torr → 40Torr

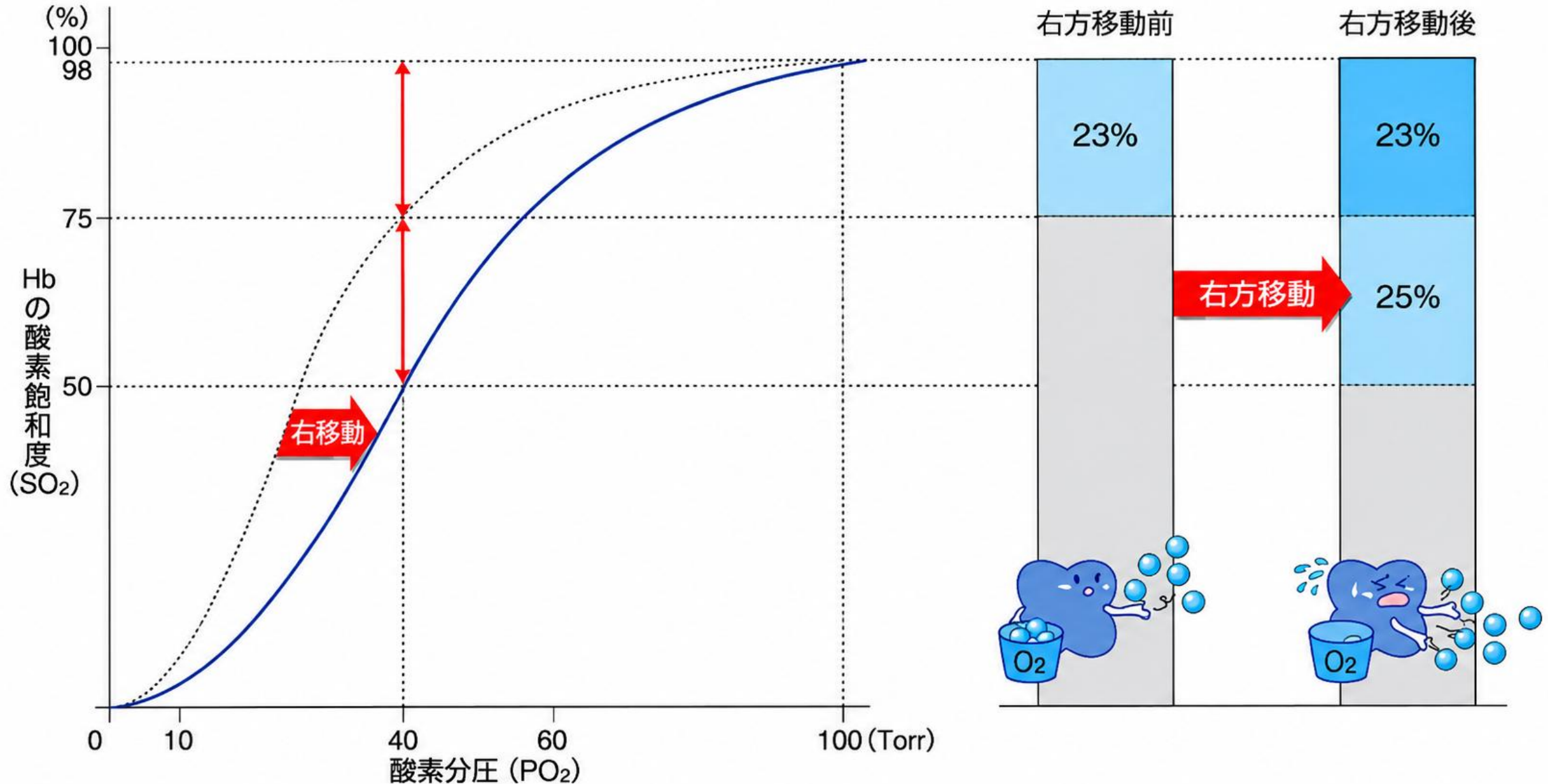


SO₂ 90% → -15% → 75%

- 酸素分圧が低い領域 (60Torr以下) では、高い領域と同程度の分圧の変化でも、Hbははるかに多くのO₂を放出する。

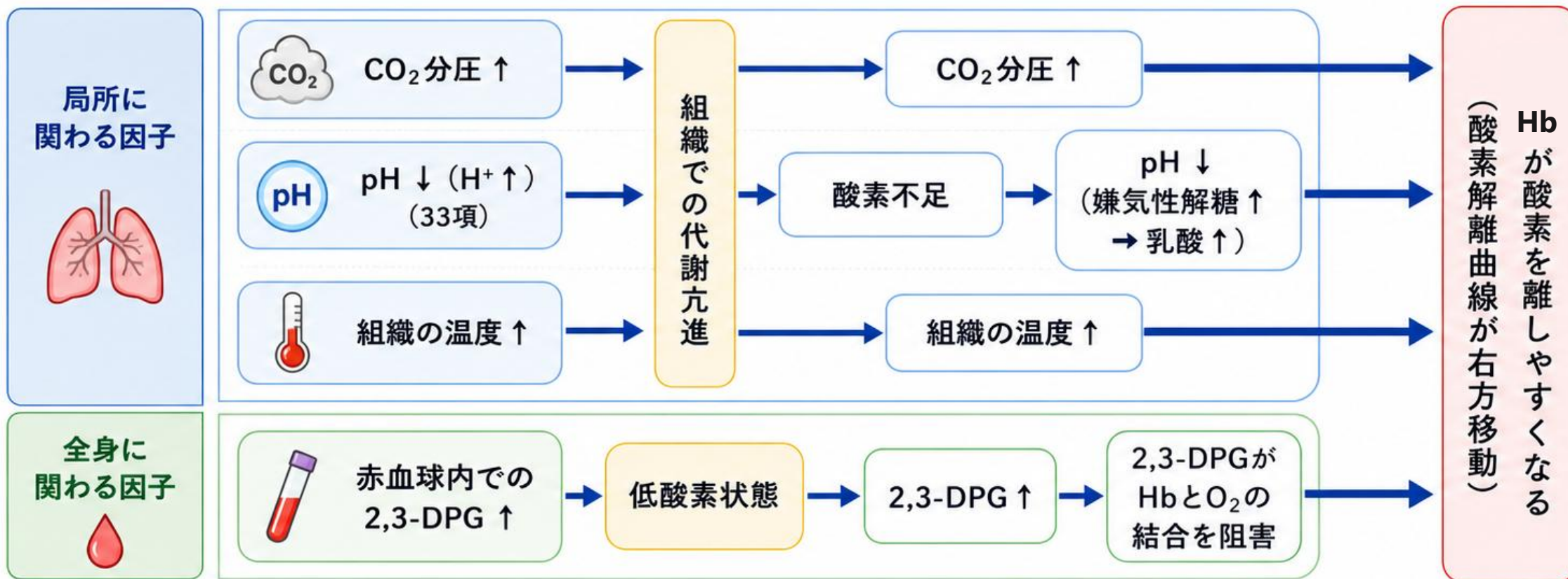
運動時の筋肉などにおける酸素解離曲線

- 下図の場合の右方移動では、酸素分圧は100Torrから40Torrに下がった場合、右方移動前に比べてHbは25%分多くのO₂を放出している。



右方移動の要因

- 低酸素状態になると、HbとO₂の親和性は低下して、HbはO₂を離しやすくなる。
- このため、低酸素状態では酸素解離曲線は右方移動する。
- 右方移動する主な要因として、下記の4つが挙げられる。



CO₂分圧、pHの変化によって酸素解離曲線が左右に移動することを **Bohr (ポーア) 効果** という。

本日の内容

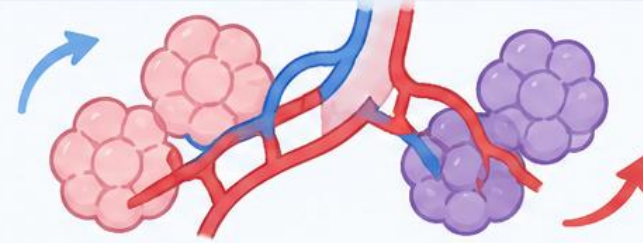
- 01 外呼吸と内呼吸
- 02 ガス ($O_2 \cdot CO_2$) の動き
- 03 呼吸の調節
- 04 酸素飽和度の特徴
- 05 低酸素血症をきたす主な原因**

低酸素血症の主な原因

1

換気血流比不均等

肺の一部で換気と血流のバランスが崩れ、酸素化が不十分になる。



2

肺内シャント

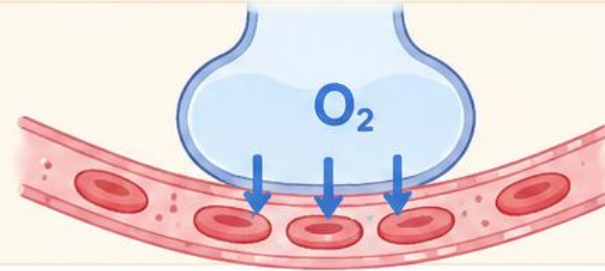
酸素が取り込まれないままの血液が、そのまま体循環に流れてしまう。



3

拡散障害

肺胞から毛細血管への酸素の移動が障害され、十分に酸素が取り込めない。



4

O₂デリバリー

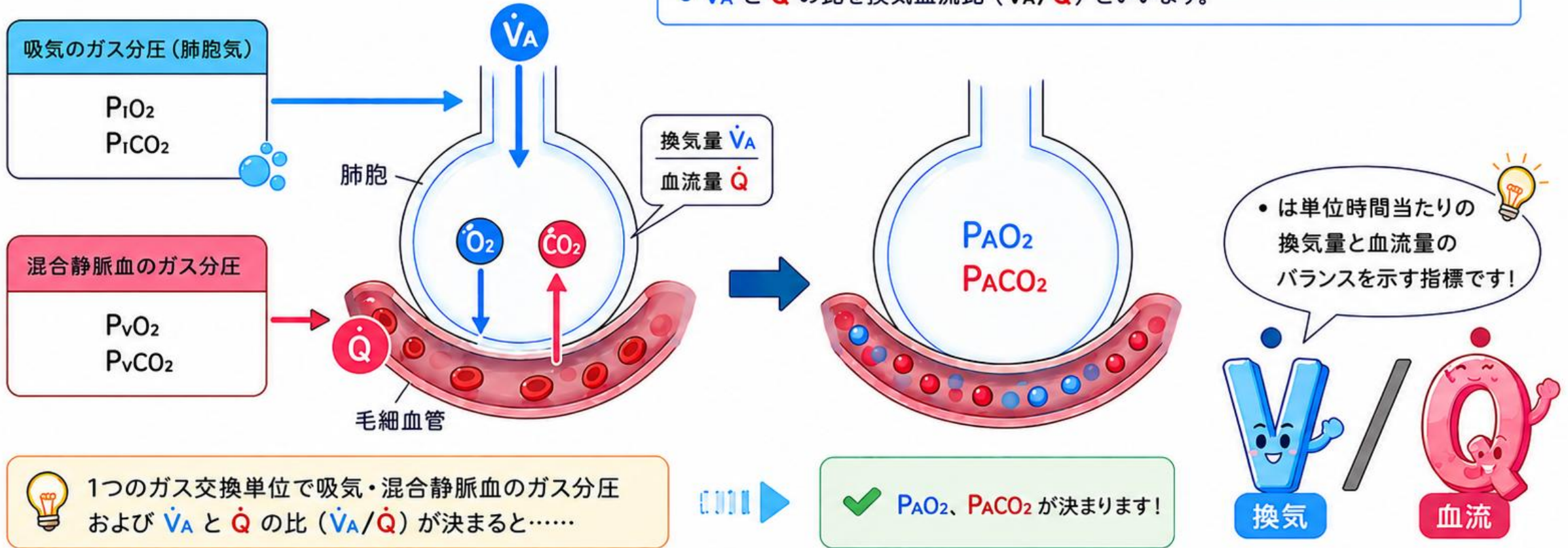
酸素運搬能の低下により、組織へ十分な酸素が届けられない。



①換氣血流比不均等

換気血流比 (\dot{V}_A/\dot{Q})とは?

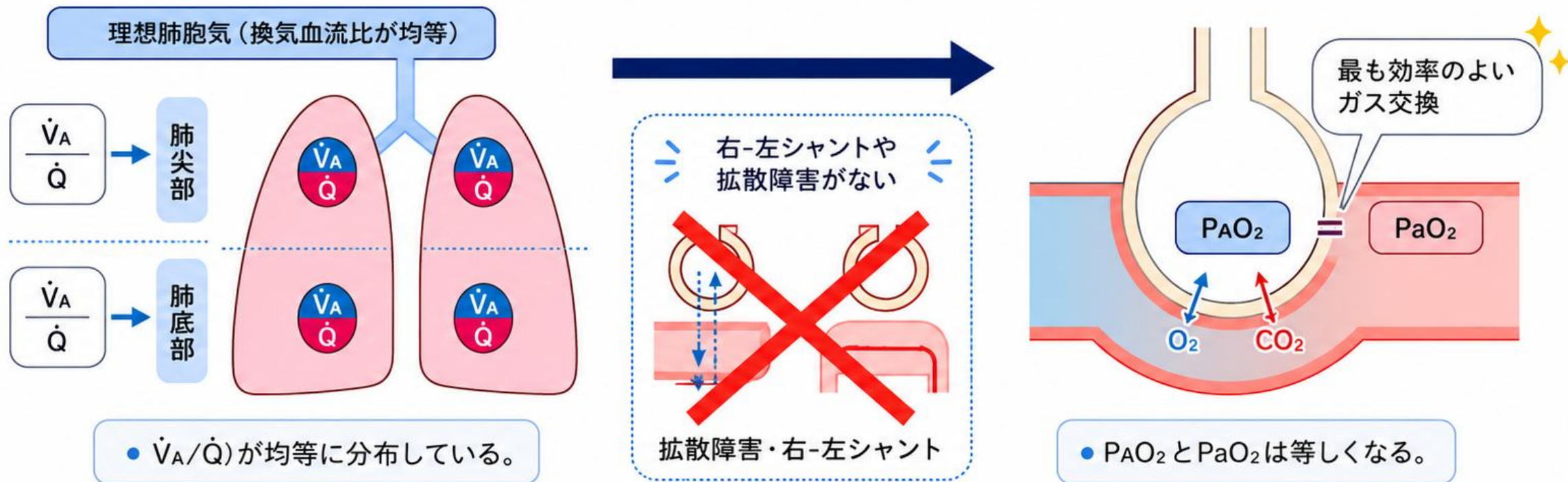
- 肺は無数のガス交換単位 (肺胞とそれに対応する毛細血管) で構成されています。
- 1つのガス交換単位における一定時間あたりの肺胞換気量を \dot{V}_A と表します。
- 1つのガス交換単位における一定時間あたりの毛細血管血流量を \dot{Q} と表します。
- \dot{V}_A と \dot{Q} の比を換気血流比 (\dot{V}_A/\dot{Q}) といいます。



i \dot{V}_A/\dot{Q} が適切に保たれることで、効率的な酸素取り込みと二酸化炭素の排出が行われます。

理想的なガス交換

- 全てのガス交換単位において換気血流比が均等であるときの肺胞気ガス組成を理想肺胞気という。
- 肺胞気が理想肺胞気であれば最も効率よくガス交換を行うことができる。
- このとき、全てのガス交換単位において右-左シャントや拡散障害がなければ、動脈血の酸素分圧 (P_{aO_2}) は理想肺胞気の酸素分圧 (P_{AO_2}) と等しくなる。



理想的な状態では、すべてのガス交換単位で換気と血流がバランスよく行われ、
拡散やシャントの障害がないため、**動脈血の酸素分圧は理想肺胞気の酸素分圧と等しくなります。**

≡ 実際の換気量の分布 ≡

- 重力の影響によって、肺尖部は肺の重さがかかるため引き伸ばされるが、肺底部はあまり重さがかからないため、あまり引き伸ばされない。
- このため、肺尖部では換気量が少なく、肺底部では換気量が多いという換気量の不均等分布がみられる。

バネと重力の関係

バネに重さがないとき



伸び方は均等

バネに重さがあるとき



重力

上部ほどよく伸びる

バネ自体の重さによって…

- 吊り下げられたバネの上部は、下部の重さがかかるため下部よりも大きく伸びる。

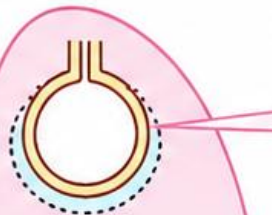
肺の場合

肺 (重さがある)

肺胞

換気量 (\dot{V}_A)

肺尖部

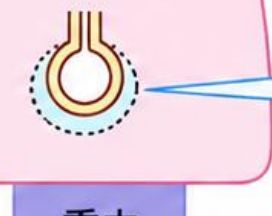


- 肺胞は引き伸ばされて広がっている。
- このため、換気したときのふくらみは小さくなる。

- 換気量は少なくなる。



肺底部



- 肺胞はあまり広がっていない。
- このため、換気したときのふくらみは大きくなる。

- 換気量は多くなる。

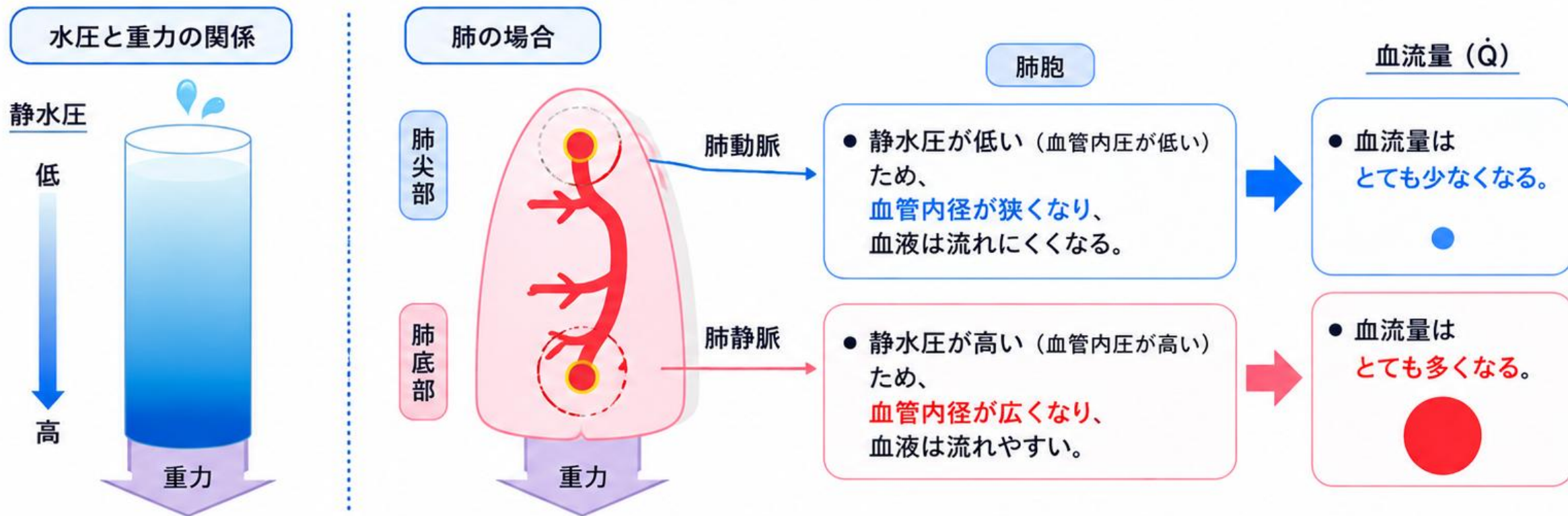


重力

- 実際の肺でもバネと同じように重力が作用するため、肺尖部は肺底部よりも大きく伸びる。

≡ 実際の血流量の分布 ≡

- 重力の影響によって、肺尖部と肺底部には、静水圧差が生じる。
- 静水圧は肺尖部で低く、肺底部で高いため、肺尖部の血管内圧は低く、肺底部の血管内圧は高くなる。
- このため、肺尖部では血流量が少なく、肺底部では血流量が多いという**血流量の不均等分布**がみられる。

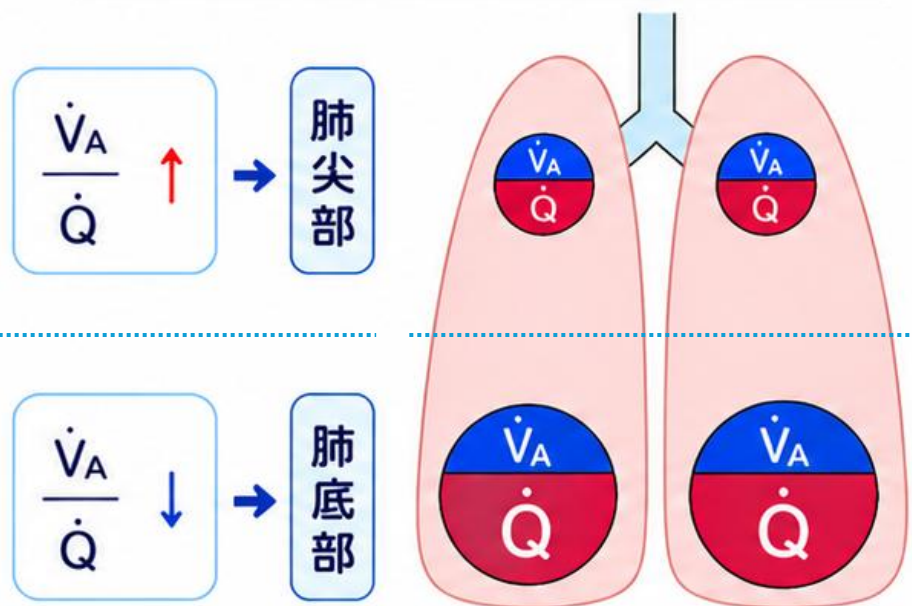


重力により静水圧が変化することで、肺では血流量が不均等に分布する。

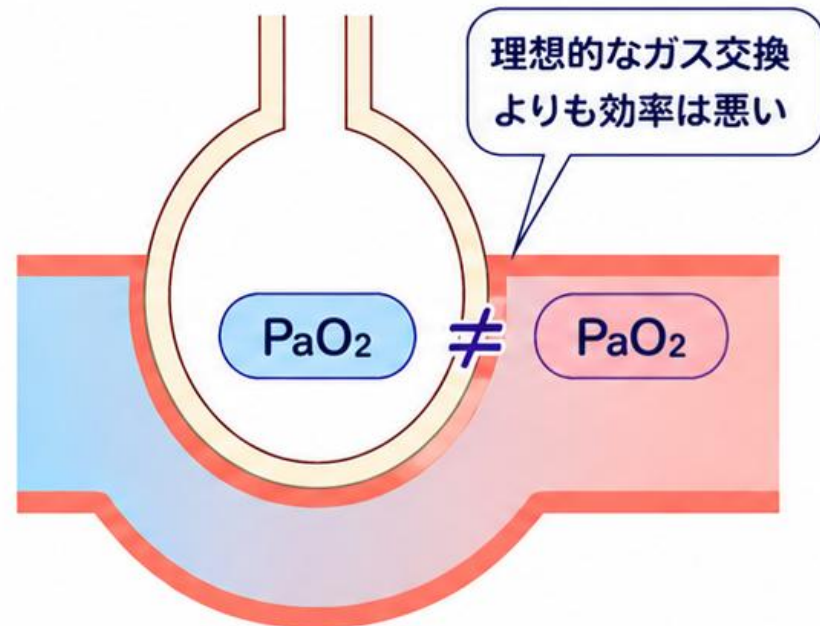
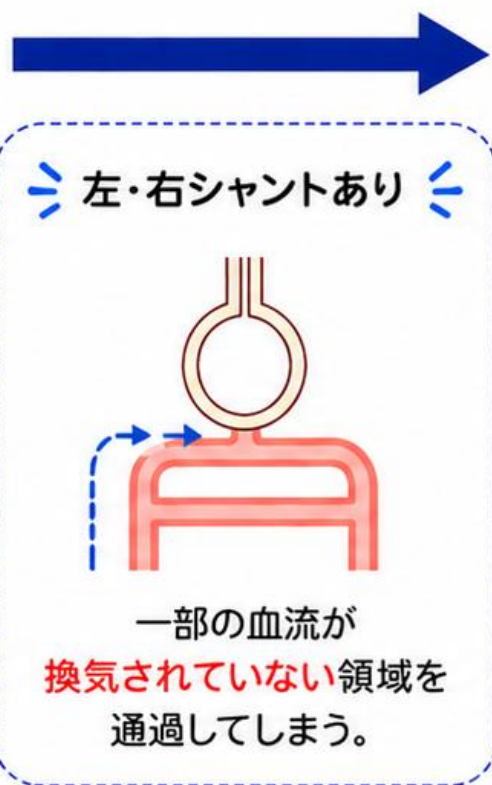
肺尖部：血流量が少ない < 肺底部：血流量が多い

≡ 実際のガス交換（酸素のみ） ≡

実際の肺胞気（生理的な換気血流比不均等）



- \dot{V}_A/\dot{Q} は不均等に分布している。



- PAO_2 より PaO_2 は低くなる。

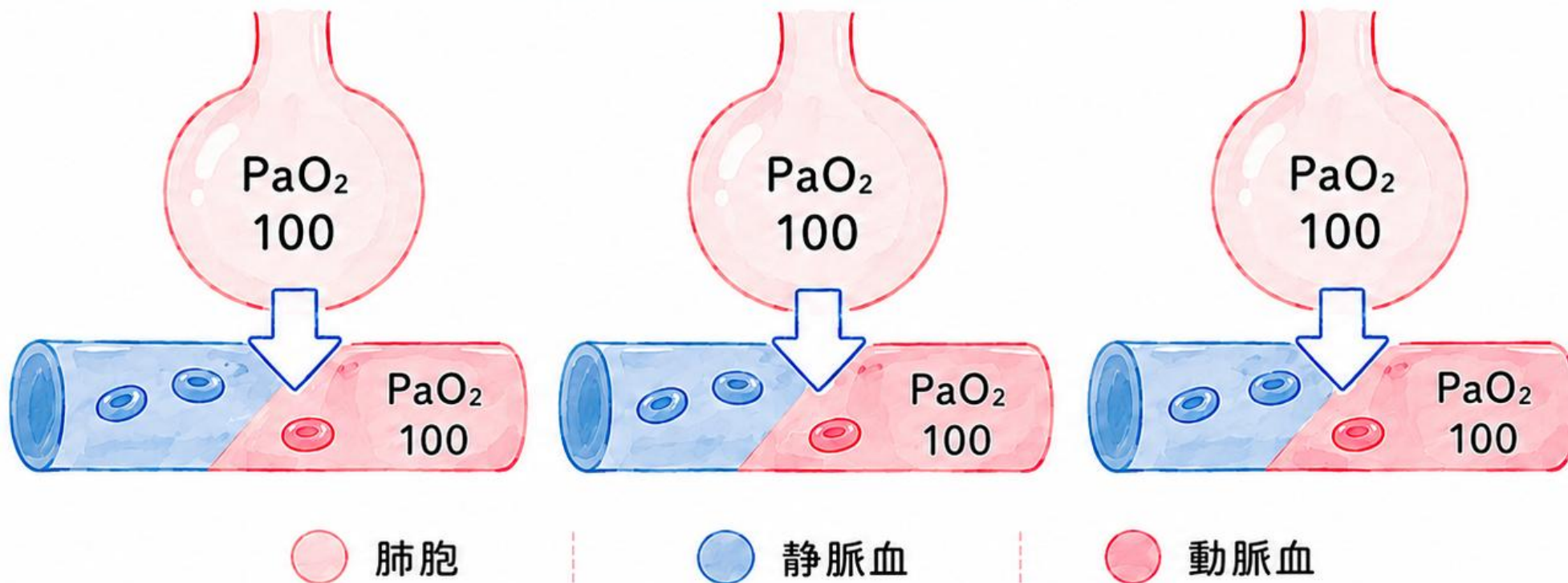


\dot{V}_A も \dot{Q} も肺尖部で少なく肺底部で多いのですが、 \dot{Q} は \dot{V}_A よりも大きく変化するので、 \dot{V}_A/\dot{Q} は肺尖部で↑、肺底部で↓となります。
 \dot{Q} の影響力が強いというわけです。



換気血流比不均等の考え方

正常の肺



分圧

(PaO₂) の平均 $(100 + 100 + 100) \div 3 = 100$ mmHg

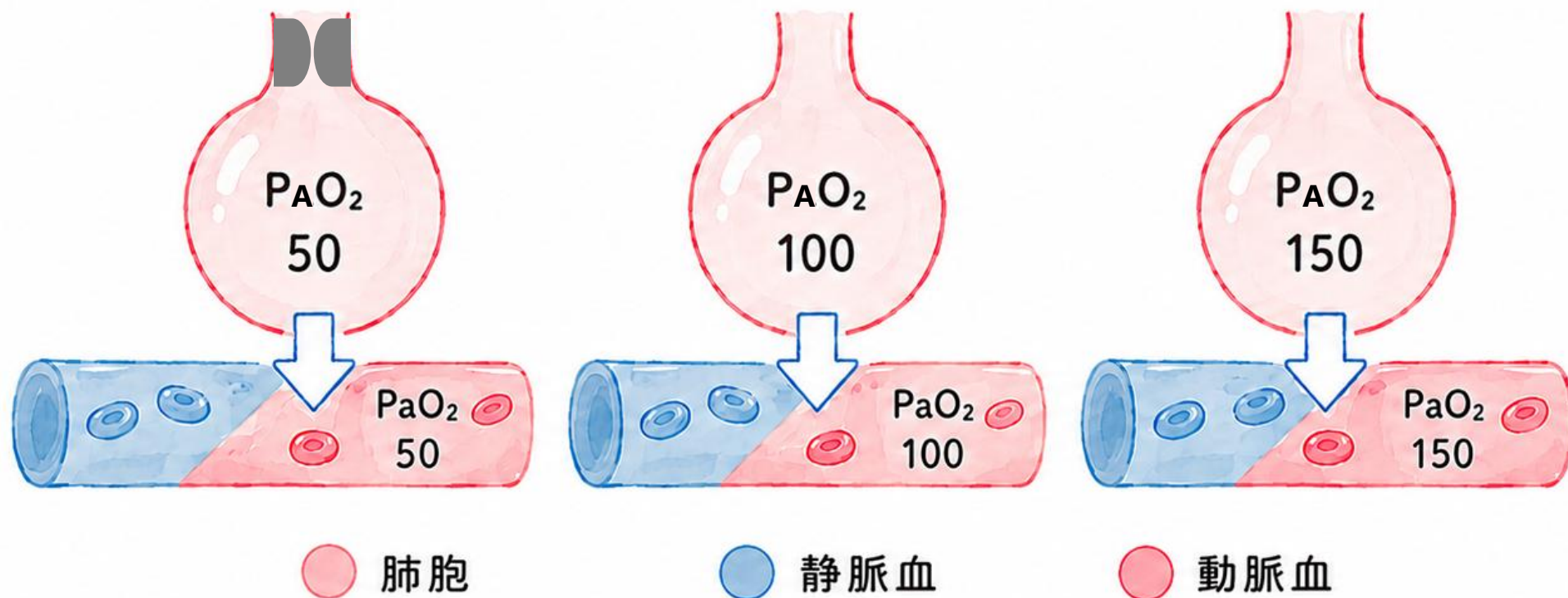
飽和度

(SaO₂) の平均 $(98 + 98 + 98) \div 3 = 98\%$

PaO₂/SaO₂ 予測表

PaO ₂ (mmHg)	SaO ₂ (%)	ポイント
10	13	
20	35	奇数を並べる
30	57	
40	75	5と7をひっくり返す
50	83	+8
60	89	+6
70	93	+4
80	95	+2
90	97	+2
100	98	+1

換気血流比不均等の考え方
低酸素状態の肺



分圧

(PaO₂) の平均 $(50 + 100 + 150) \div 3 = 100$ mmHg

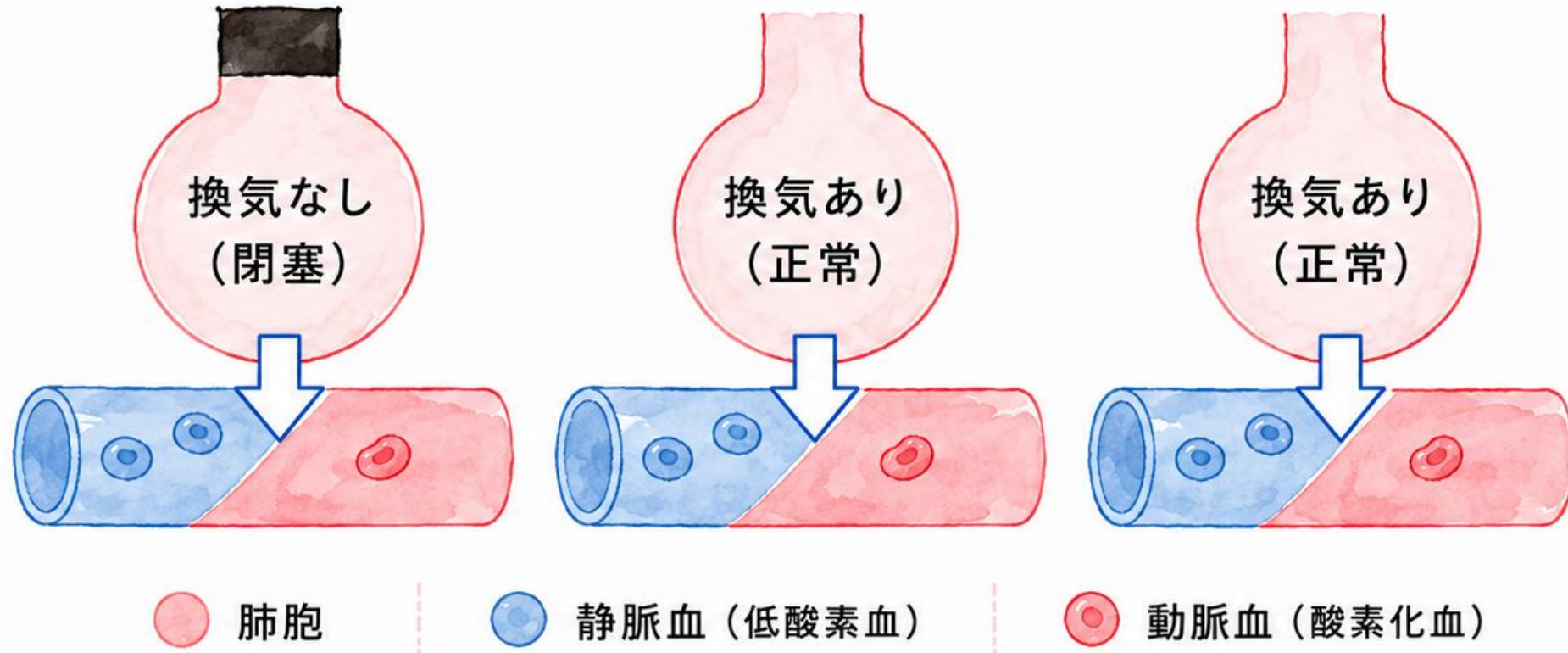
飽和度

(SaO₂) の平均 $(\quad + \quad + \quad) \div 3 = \quad \%$

②肺内シヤント

換気血流比不均等の極限

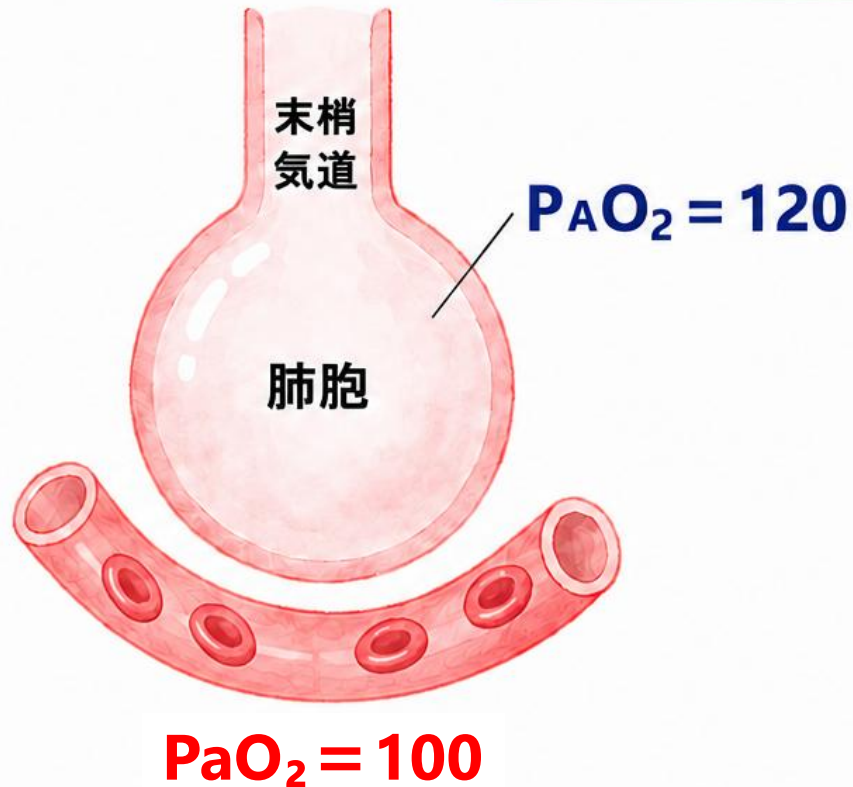
肺内シャント



完全に閉塞しているため
酸素投与の恩恵を受けにくい

A-aDO₂

肺胞気動脈血酸素分圧格差



肺胞まで入ってきた酸素 ($P_{A}O_2$) が拡散によってどの程度血液の中に入ることができたか ($P_{a}O_2$) を表す。

開大は低酸素血症を示す

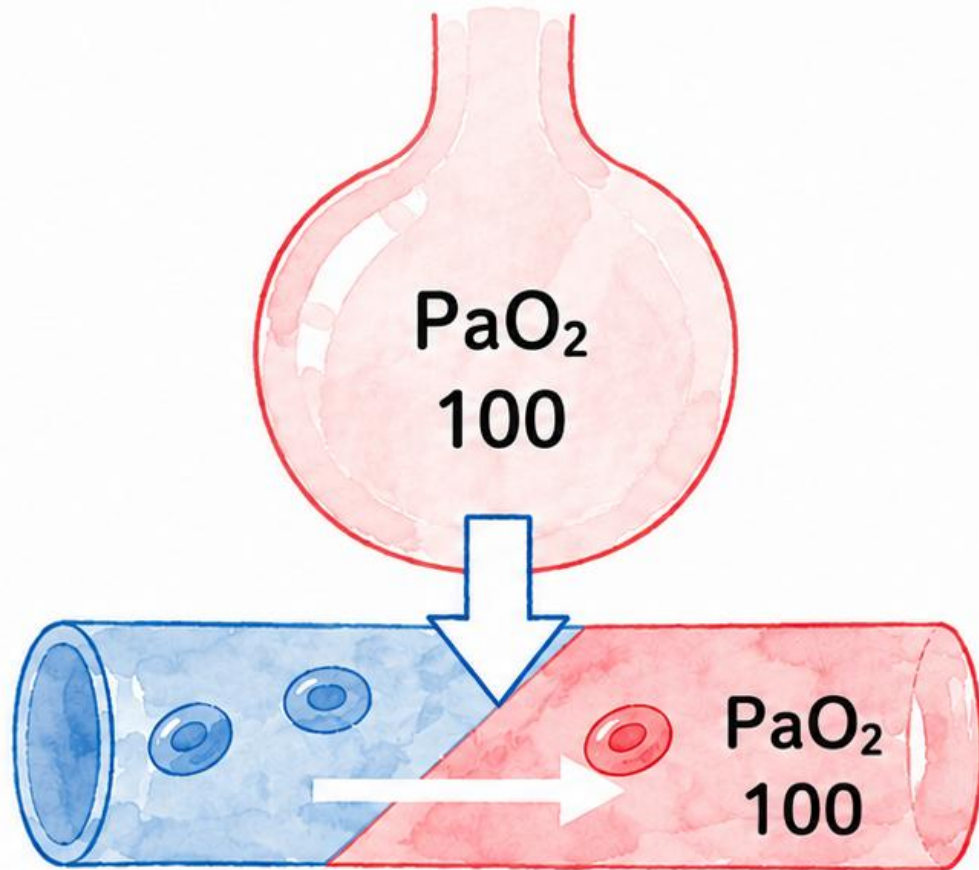
$$A-aDO_2 = P_{A}O_2 - P_{a}O_2$$

$$\text{※ } P_{A}O_2 = (760 - 47 \times F_{i}O_2) - P_{a}CO_2 / 0.8$$

③ 拡散障害

安静時

肺胞と血管（正常）



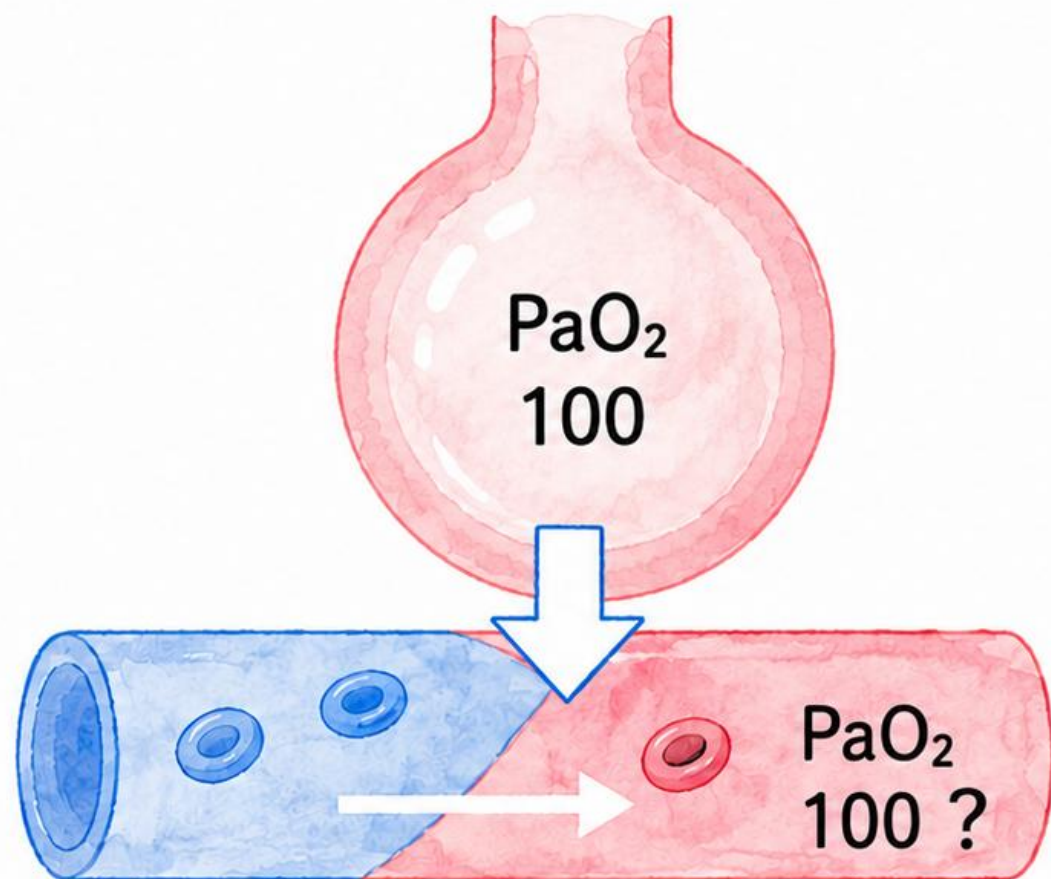
健常者

PaO_2 が100mmHgに
達する時間は0.25秒

※肺毛細血管内の血液が
肺胞と接する時間は0.75秒
多くの間質性肺疾患患者も安静時は
0.75秒以内に O_2 の受け渡しが完了

運動時

肺胞と血管（間質性肺疾患）



拡散（肺胞から
血管への酸素の受け
渡し）に0.75秒以上
の時間を要する



低酸素血症

拡散障害は、安静時は低酸素なし

1. 正常

肺胞から血管内に酸素の受け渡しが十分にできる



乗り場 (肺胞) から
ジェットコースター (血管) に
しっかり乗れて、
目的地までちゃんと届く!

拡散障害は運動時に異常が起こる！

2. 異常

肺胞の壁が厚くなったり、血管が狭くて血流が速いと酸素の受け渡し時間が確保できず、酸素が移動できない

① 乗り場からジェットコースターまでの間が空いていて乗りにくい

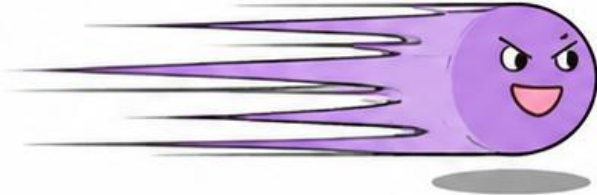

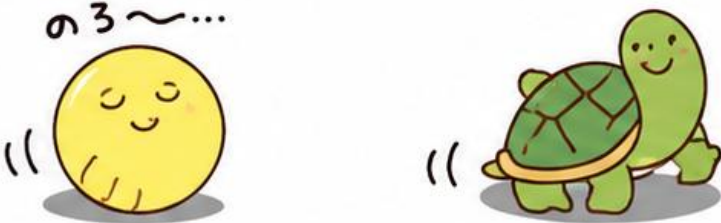


② ジェットコースターの動きが速くて乗り込めない



≡ 拡散能 ≡

- 肺胞気からヘモグロビン分子までのガスの拡散のしやすさを拡散能 (DL) という。
- 拡散能はガスの種類によって異なり, CO_2 が最も高く, O_2 , CO の順に低くなる。

ガスの種類	拡散能	拡散速度のイメージ	特徴
二酸化炭素 (CO_2)	高		● O_2 の約20倍拡散しやすい。
酸素 (O_2)			● 拡散能は CO の約1.23倍であり, 比較的拡散能は低い。
一酸化炭素 (CO)	低	のろ〜... 	● CO_2 , O_2 と比べ, 拡散能が低い。

④ O₂デリバリー

O₂デリバリー

CaO₂

動脈血酸素含量

×

Q̇

血流量



酸素

ヘモグロビン



各臓器

