

頭の準備体操

循環動態アカデミー顧問
循環制御システム研究機構
九州大学名誉教授
砂川 賢二



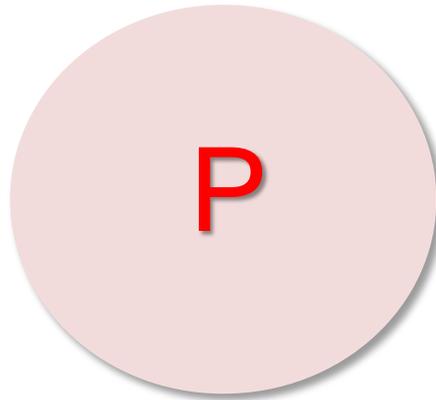
雑学クイズ 1

エラスタンスが1.0 mmHg/mlの風船に100mlの水を入れ、水深1mに沈める。大気圧が10%増加すると風船の絶対圧は幾らになるか

A 100

B 860

C 1012 mmHg



雑学クイズ 2

健常者では心機能が亢進すると心拍出量は増加する

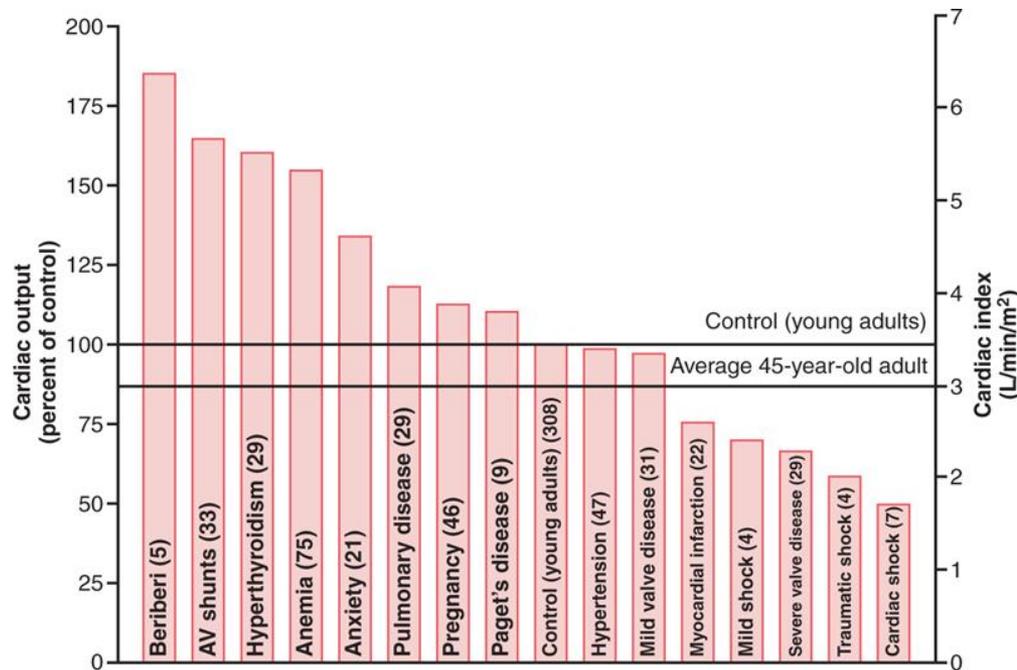
A True, B False



雑学クイズ 3

一般に貧血ではCOが増加する。貧血でHbが半分になると、混合静脈血の酸素飽和度が不変であれば、COは倍になる

A True, B False



Hall: Guyton and Hall Textbook of Medical Physiology, 12th Edition
Copyright © 2011 by Saunders, an imprint of Elsevier, Inc. All rights reserved.

雑学クイズ 4

心臓の外部仕事率 (Power output) は全身の仕事率の

A $1/7$

B $1/70$

C $1/140$



原理に基づく理解

- 循環系の存在理由
- 内部環境の恒常性を支える循環器
- 心拍出量の必要量を定める命の三角形
- 心拍出量を供給する物理系

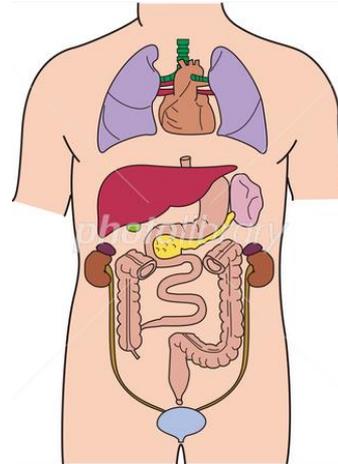
生命とは

単純な生命体 (外部環境依存)



1. metabolism
2. growth
3. reproduction
4. adaptation to environment
5. ability to respond to stimuli

多臓器システム (外部環境非依存)



変動する要求



エネルギーを消費しつつ内部環境の恒常性

人は何ワット(W)



- 安静時代謝 = 25kcal/kg/dayから W を求めると(1cal = 4.18J)
 $25 \cdot 10^3 \cdot 4.18 / (86.4 \cdot 10^3) = 1.21 \text{ W/kg}$
- 体重 60 kgだと
 $1.21 \cdot 60 = 72.6 \sim 70 \text{ W}$
- 基礎代謝における O_2 必要量は (1ml O_2 =20Jのエネルギー産生)
 $1.21 \cdot 60 / 20 \approx 3.5 \text{ ml/kg/min}$
 $= 1 \text{ METS}$



心臓(左室)は何ワット



CO=5.0L/min、MAP=100mmHgとすると(水銀の比重=13.6、 $g=9.81 \text{ m/s}^2$) Cardiac power output (CPO)は

$$\begin{aligned} \text{CPO} &= 5 \cdot 100 \cdot 10^{-3} \cdot 13.6 \cdot 9.8 / 60 \\ &= 5 \cdot 100 / 450 \\ &= 1.1 \text{ W} \\ &= \text{MAP} \cdot \text{CO} / 450 \end{aligned}$$

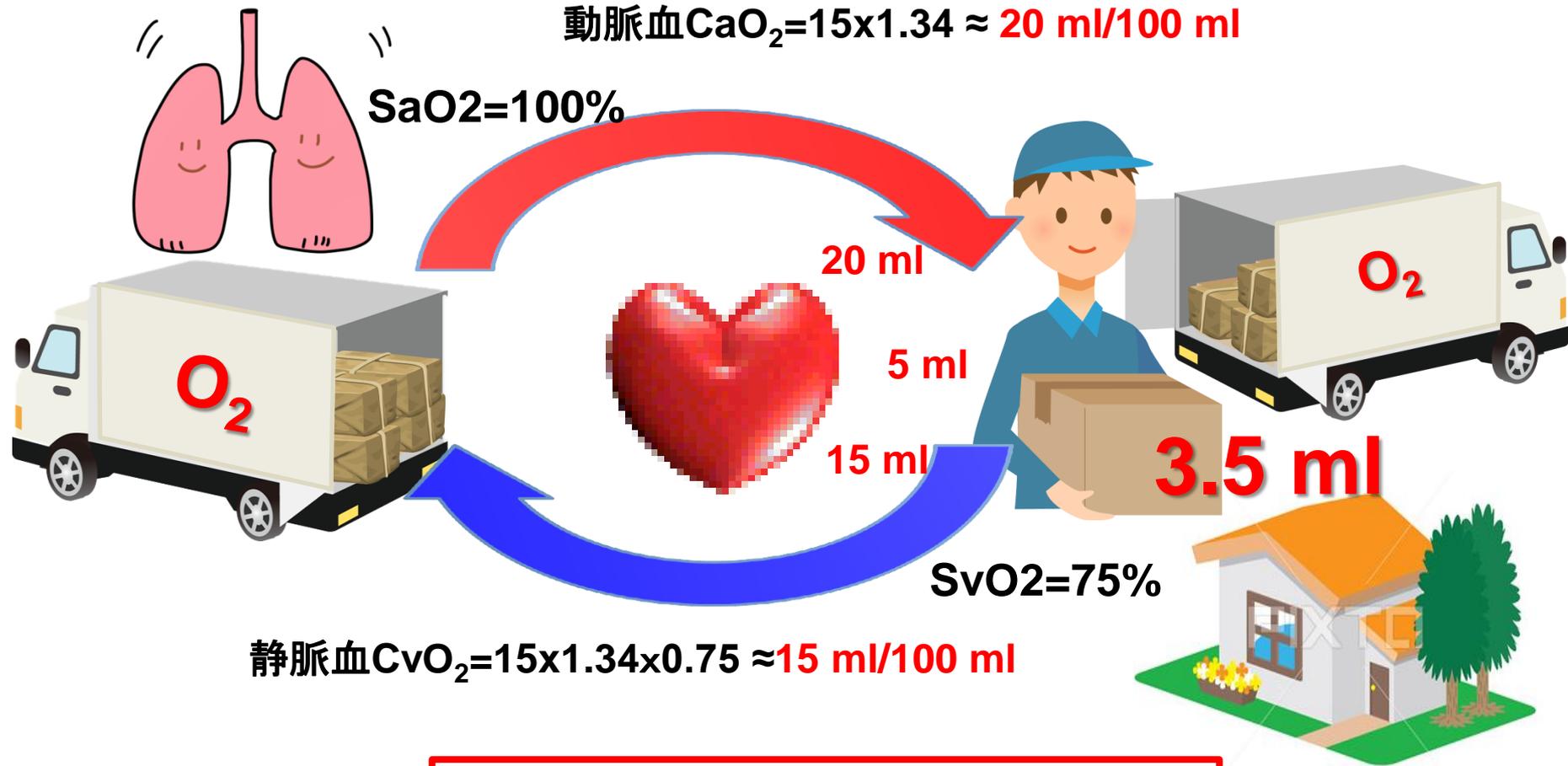
ただしEnergy変換効率は

$$\text{PVA} \Rightarrow \text{EW} = 0.6,$$

$$\text{MVO}_2 \Rightarrow \text{PVA} = 0.2$$

より $\text{MVO}_2 \Rightarrow \text{EW} = 0.12$ から $1/0.12 \approx 8$ 倍 (~9W) のEnergyを消費している。

エネルギーの必要量が心拍出量を決める



動脈血 $CaO_2=15 \times 1.34 \approx 20\text{ ml}/100\text{ ml}$

$SaO_2=100\%$

20 ml

5 ml

15 ml

3.5 ml

$SvO_2=75\%$

静脈血 $CvO_2=15 \times 1.34 \times 0.75 \approx 15\text{ ml}/100\text{ ml}$

$$\begin{aligned} CO &= 100 \times 3.5 / (20 - 15) = 70\text{ ml}/\text{kg}/\text{min} \\ &= 70 \times 60 = 4.2\text{ L}/\text{min} \end{aligned}$$

恒常性を支える命のトライアングル



燃料



25 kcal/kg/day

$O_2/ml \approx 20J = 4.18cal$



酸素

3.5 ml/kg/min (1.21W)

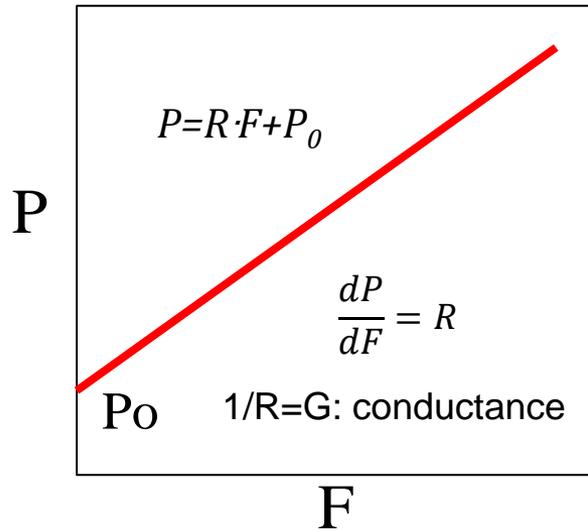
循環



70 ml/kg/min
4.2 L/min/60kg

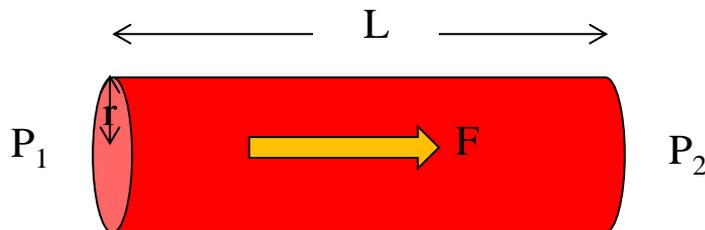
血管構成要素 抵抗 Resistance

Pressure-flow relationship



大動脈	直径 3cm	長さ 50cm
細動脈	直径 15 μ m	長さ 1.0 mm
大動脈/細動脈径比		2000
大動脈/細動脈長比		500
推定抵抗比		$1/3 \cdot 10^{10}$
血管数		$1/3 \cdot 10^8$
抵抗比(大/細)		1/100

The law of Poiseuille



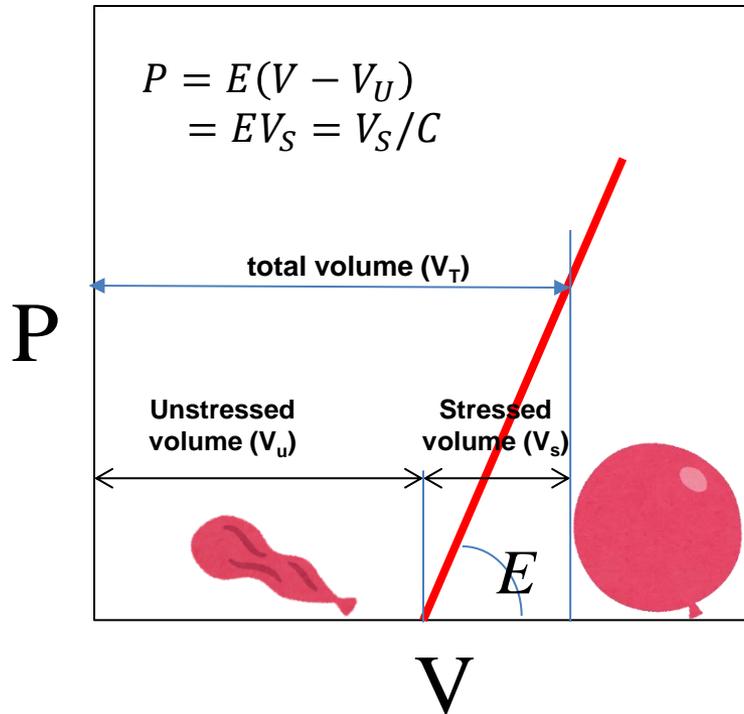
$$P_1 - P_2 = \left(\frac{8\eta L}{\pi r^4} \right) F$$



$$R_{\text{total}} = R_1 + R_2$$

血管構成要素 Compliance, Elastance

Pressure-volume relationship



$$V = CP$$

C: compliance ($1/E$)

- Stress Volume は、 $V = CP$ (or $P = EV$)
- 血流は容量の時間微分なので

$$F = \frac{dV}{dt} = C \frac{dP}{dt}$$

- Cは圧変動があると ($\frac{dP}{dt} \neq 0$) 血流が生じる。
- 心臓は拍動して駆出するので、Cは血圧や血流に影響を与える。
- 血管床の血液はstressed volume (V_S) と unstressed volume (V_U) で構成されている。すなわち

$$V_{\text{total}} = V_U + V_S$$

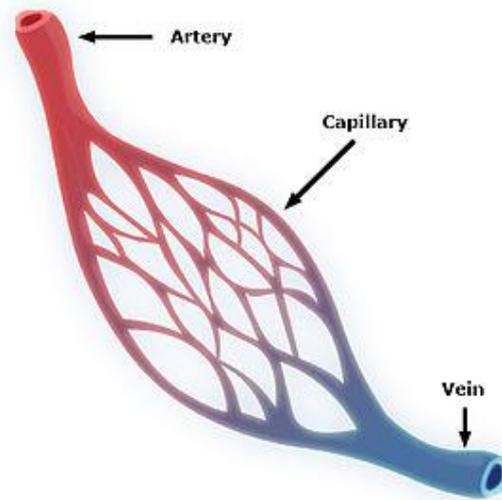
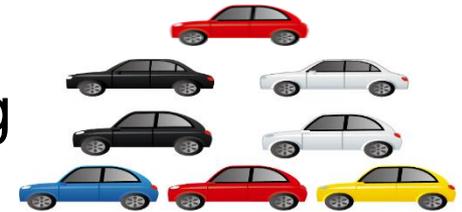
- 自律神経は V_U を変え、 V_S を変化させる。

大気圧に押し潰される血管

大気圧 $\approx 1.0 \text{ kg/cm}^2$

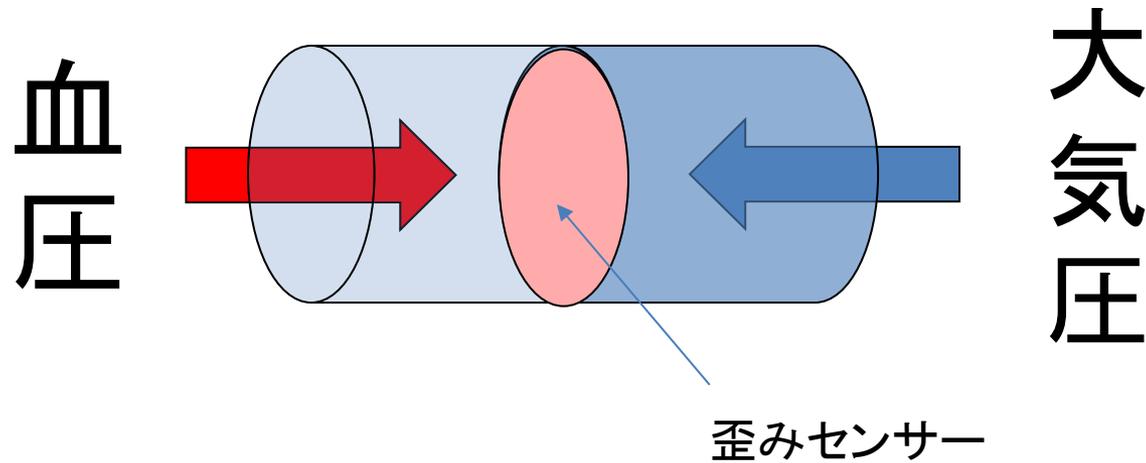
体表面積 $= 170 \times 50 = 8,500 \text{ cm}^2$

体表総力 $= 8,500 \times 1 = 8500 \text{ kg}$



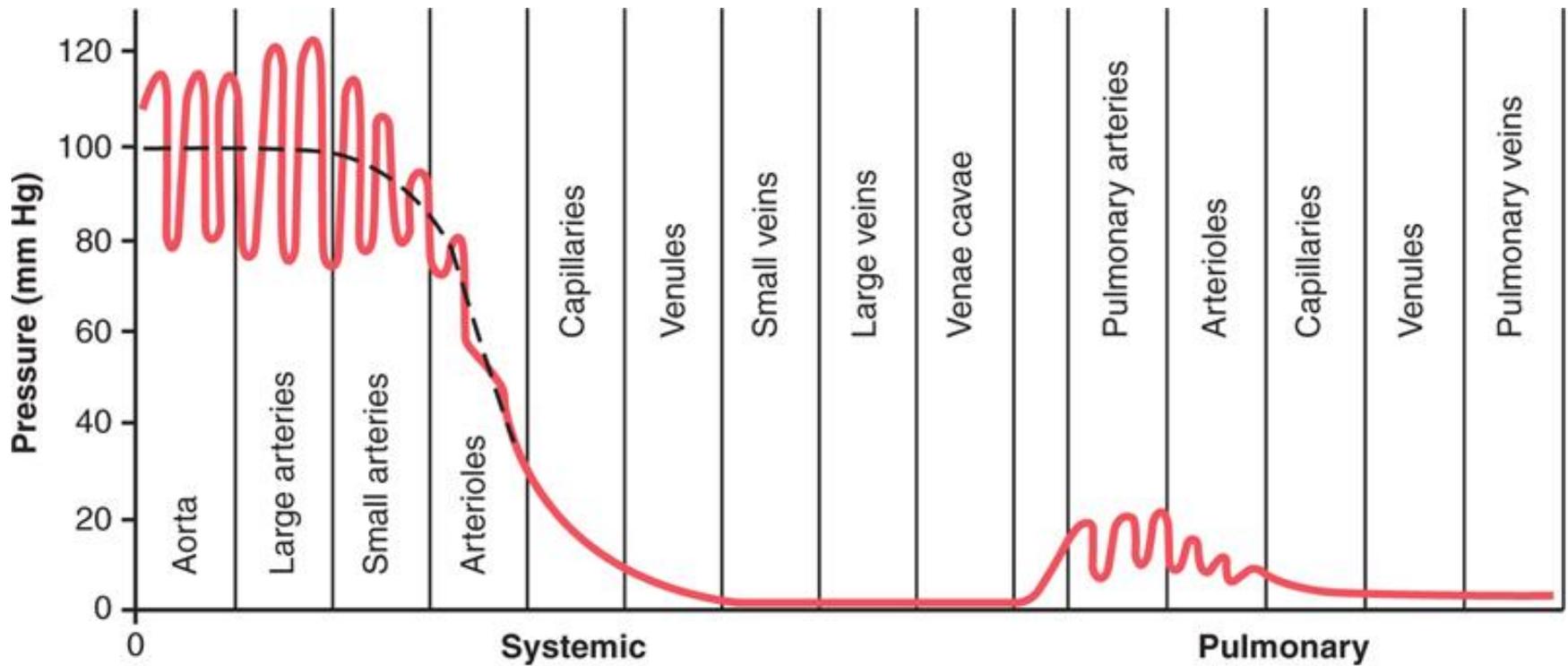
血管内圧 $>$ 大気圧でない
と、血管は押し潰され血流
は途絶する！

血圧の測定原理



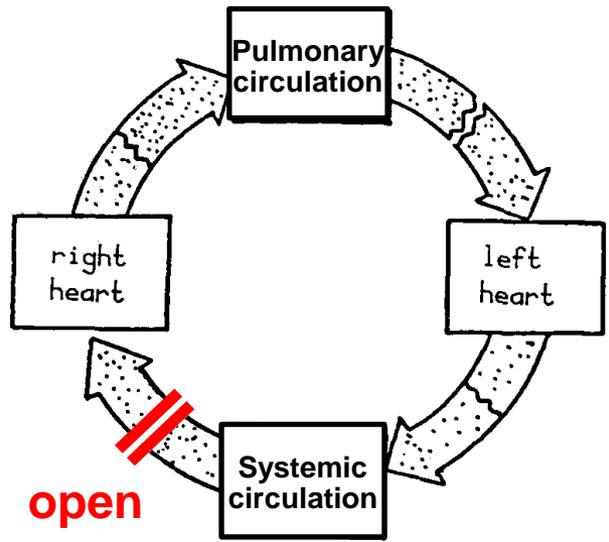
- 血圧は歪みセンサーで計測
- 血圧の絶対値は大気圧で変動(-100~50 mmHg)
- (センサーには大気圧を測定するための空気孔があり、圧較差を測定)

血圧分布



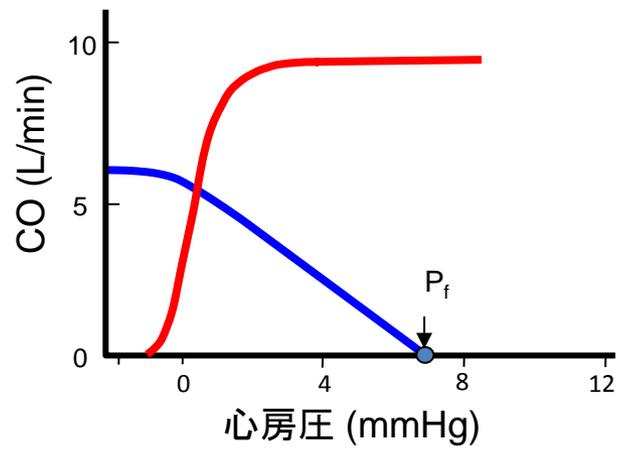
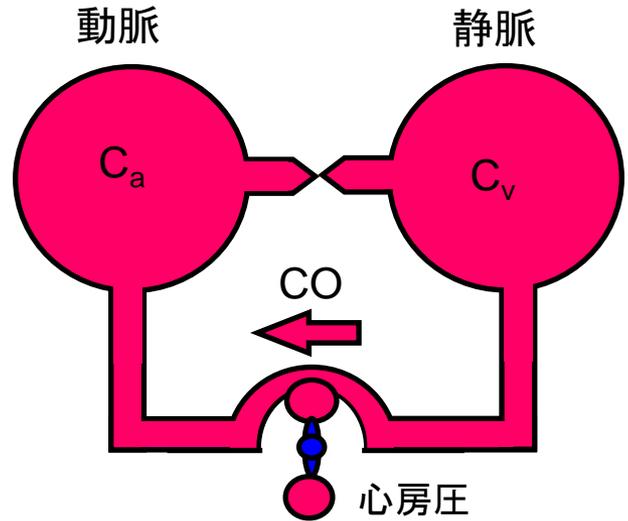
Hall: Guyton and Hall Textbook of Medical Physiology, 12th Edition
Copyright © 2011 by Saunders, an imprint of Elsevier, Inc. All rights reserved.

循環を解く:ポンプと血管特性の分離に50年

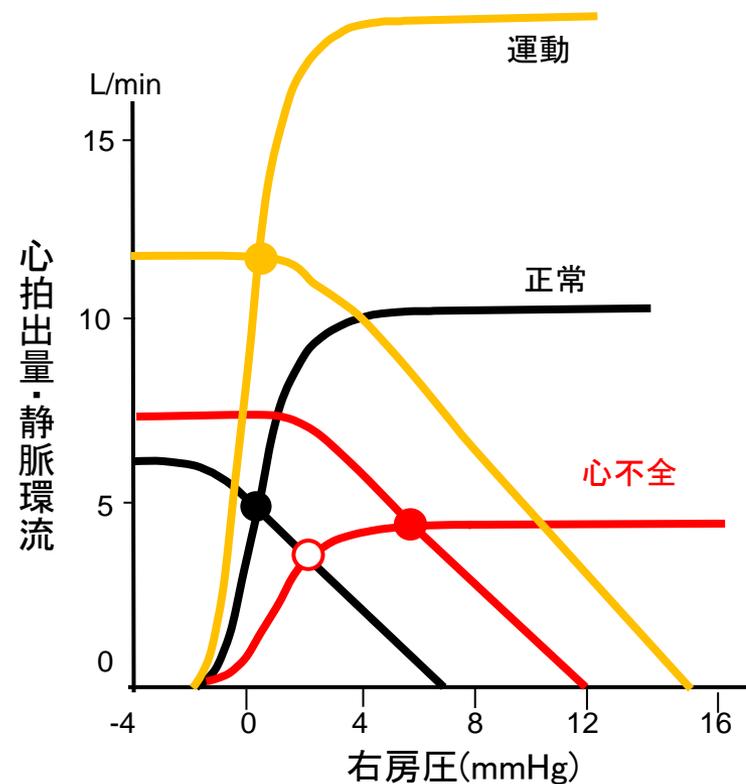
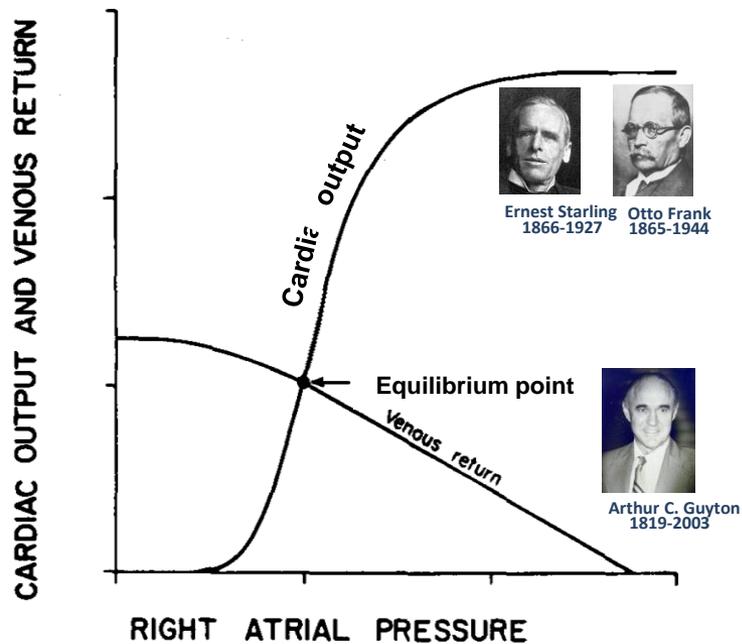


Sunagawa K et al. Ann Biomed Eng 1984

- 開放点に現れる圧と流量から前向きに心拍出量曲線、後ろ向きに静脈還流を定義することでポンプと血管特性の分離に成功
- 心拍出量曲線と静脈還流が交差する(等しくなる)点が循環平衡



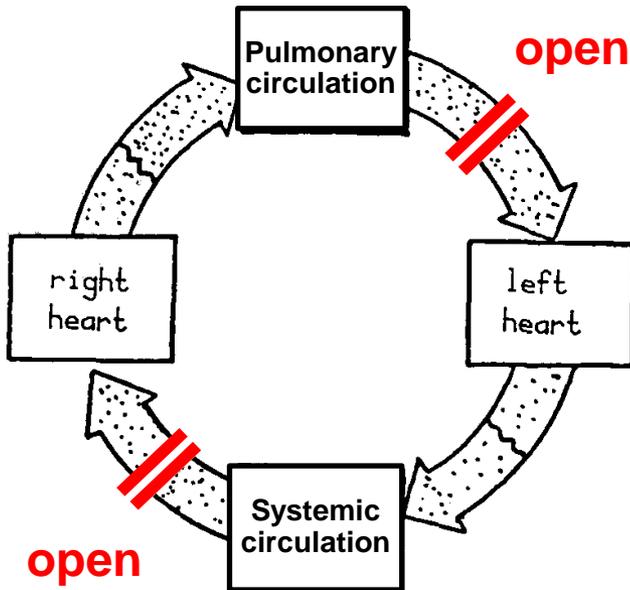
循環平衡の概念確立



- 循環平衡は運動や心不全等の多くの血行動態を説明
- 左心不全や右心不全は原理的に定義できず普遍性に限界。

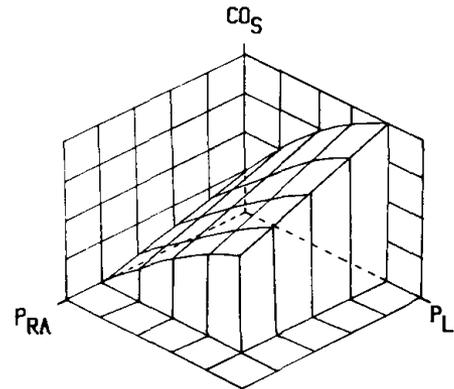
循環を解く: 2カ所でループを開く

- 2カ所の開放点に現れる心拍出量曲線、静脈還流を2カ所の圧の関数として定義

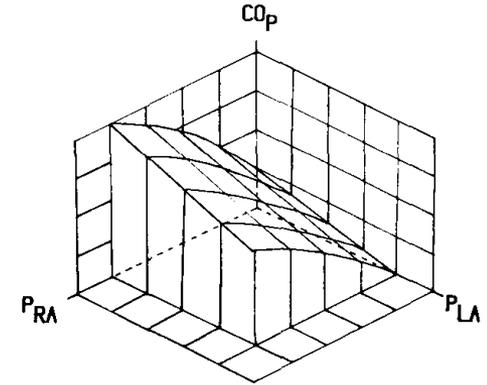


Sunagawa K et al, Annals BME 16, 1984

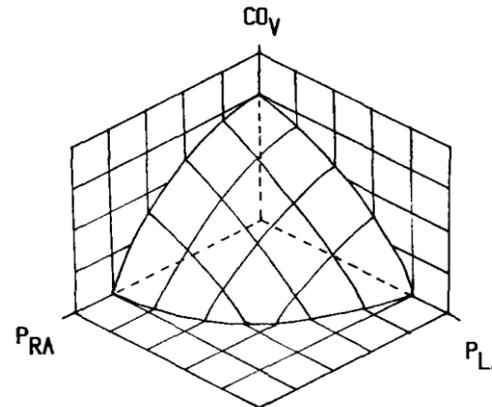
Systemic cardiac output surface



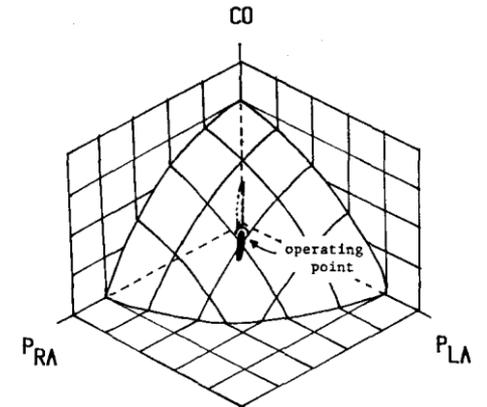
Pulmonary cardiac output surface



Venous return surface



Generalized circulatory equilibrium



- 循環平衡で左心不全や右心不全を含む殆ど全ての病態の巨視的な血行動態の説明に成功
- 心機能と心拍出量曲線の関係の曖昧さが残る

問題に戻ります

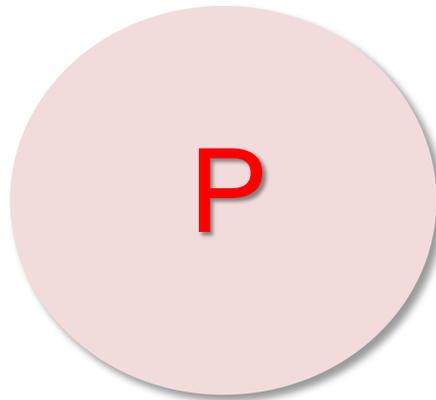
雑学クイズ 1

エラスタンスが1.0 mmHg/mlの風船に100mlの水を入れ、水深1mに沈める。大気圧が10%増加すると風船の絶対圧は幾らになるか

A 100

B 860

C 1012 mmHg



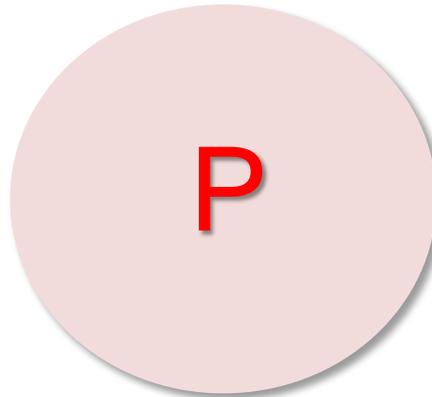
雑学クイズ 1

エラスタンスが1.0 mmHg/mlの風船に100mlの水を入れ、水深1mに沈める。大気圧が10%増加すると風船の絶対圧は幾らになるか

A 100

B 860

C 1012 mmHg



$$\begin{aligned} P &= 100 + 760 + 76 + 76 \\ &= 1012 \text{ mmHg} \end{aligned}$$

環境圧との差分でPを定義すると

$$\begin{aligned} P &= 1012 - 760 - 76 - 76 \\ &= 100 \text{ mmHg} \end{aligned}$$

雑学クイズ 2

健常者では心機能が亢進すると心拍出量は増加する

A True, B False

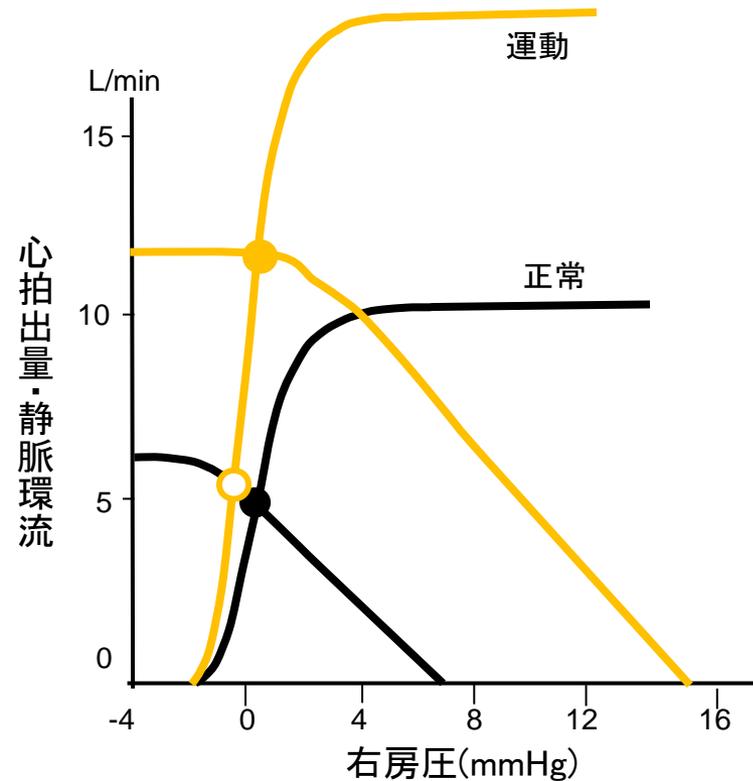


雑学クイズ 2

健常者では心機能が亢進すると心拍出量は増加する(A True, B False)



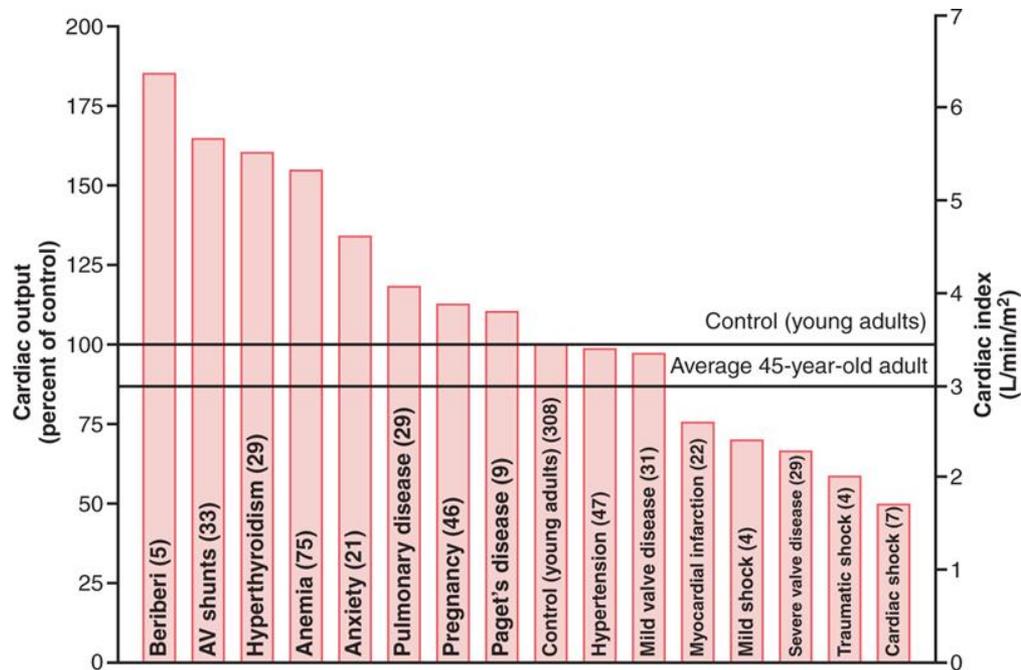
PMのrate設定ではCOほぼ一定
心移植患者でもCO増加



雑学クイズ 3

一般に貧血ではCOが増加する。貧血でHbが半分になると、混合静脈血の酸素飽和度が不変であれば、COは倍になる

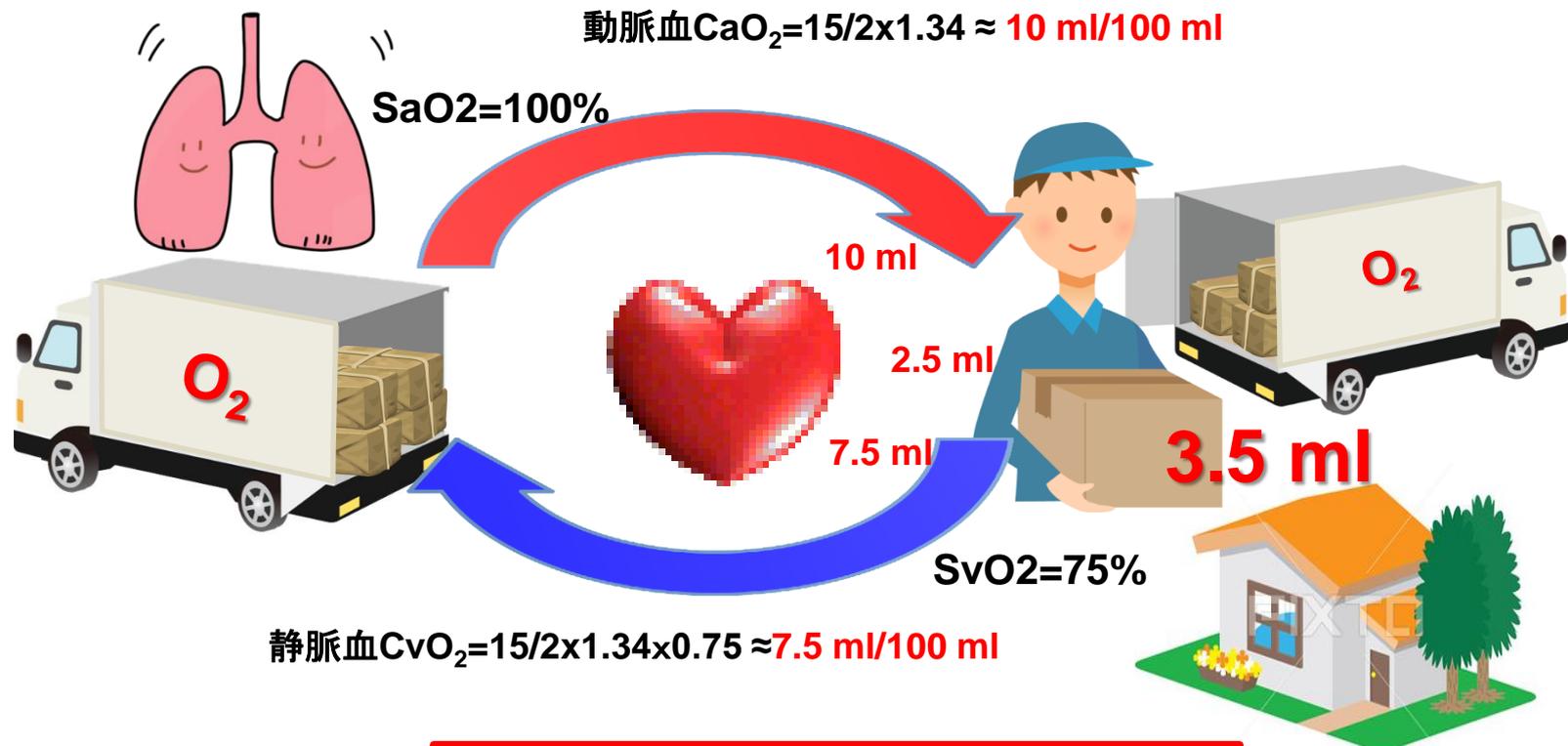
A True, B False



Hall: Guyton and Hall Textbook of Medical Physiology, 12th Edition
Copyright © 2011 by Saunders, an imprint of Elsevier, Inc. All rights reserved.

雑学クイズ 3

一般に貧血ではCOが増加する。Hbが半分になると、混合静脈血の酸素飽和度が不変であれば、COは倍になる (A True, B False)。



雑学クイズ 4

心臓の外部仕事率 (Power output) は全身の仕事率の

A 1/7

B 1/70

C 1/140



雑学クイズ 4

心臓の外部仕事率 (Power output) は全身の仕事率の

A 1/7

B 1/70

C 1/140



$$\text{CPO} = \text{MAP} \cdot \text{CO} / 450 = 1.1 \text{ W}$$

ただしEnergy変換効率

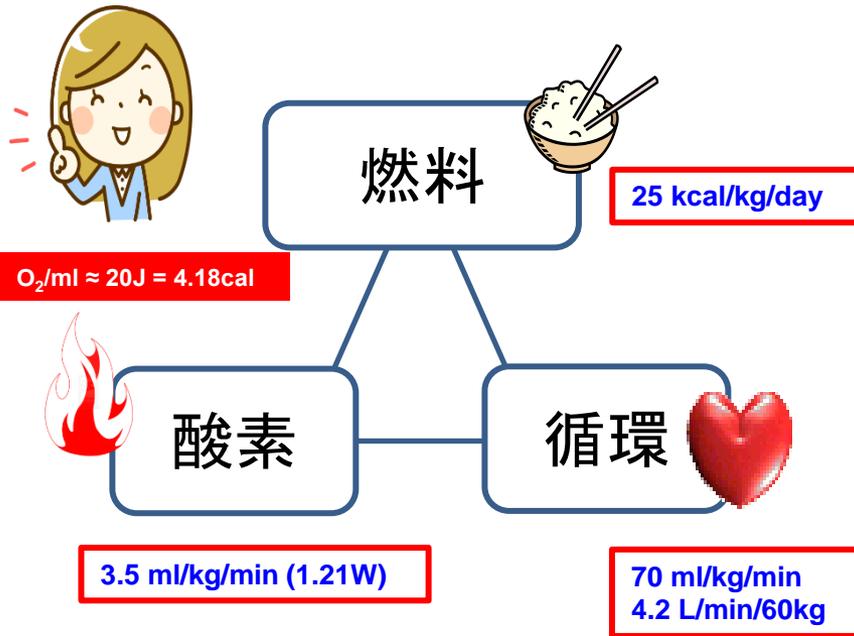
$$\text{PVA} \Rightarrow \text{EW} = 0.6,$$

$$\text{MVO}_2 \Rightarrow \text{PVA} = 0.2$$

より $\text{MVO}_2 \Rightarrow \text{EW} = 0.12$ から $1/0.12 \approx 8$ 倍
($\sim 9\text{W}$) のEnergyを消費している。

頭の準備体操まとめ

命の三角形



一般化循環平衡

