

明日から役立つ！ 血行動態の極意 ～その①～

- 心拍出量の必要量はどうか決まる？
- 空気に押し潰される静脈
- 心拍出量は血管が生み出す



砂川 賢二
(社)循環制御システム研究機構
九州大学名誉教授

Dr. 砂川レクチャースライドの共有にあたって

- 三重大大学麻酔科にて行った講義スライドを共有させていただきます。
- 講義資料を2つのパートに分けてアップロードしております。
- 本資料を内部資料以外で 사용되는場合はアカデミー事務局までご連絡ください。
- その他、ご質問などはinfo@circ-dynamics.jpまでお願いします。



その①

1. 心拍出量の必要量はどうか決まる？
2. 空気に押し潰される静脈
3. 心拍出量は血管が生み出す

その②

4. Frank-Starlingと心臓圧容積関係
5. 心室圧容積面積と消費エネルギー

本日の目標と進め方

- 医学教育では教えられていない血行動態の基礎の基礎
- 進め方
原理の理解
思考実験による応用
練習を繰り返すことにより身につける
- 基礎の理解がすべて。応用は原理に基づいて推論

これが分かれば免許皆伝！

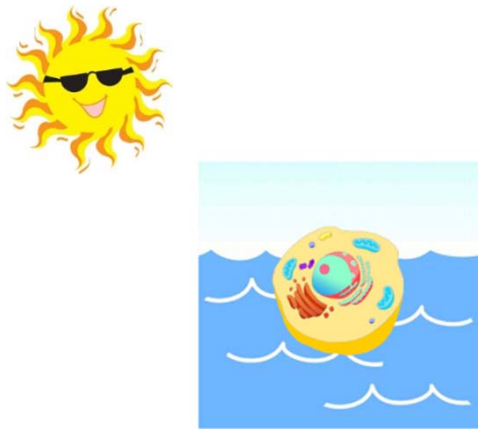
1. 心拍出量の必要量はどう決まる
2. 空気に押し潰される静脈
3. 心拍出量は血管が生み出す（静脈還流、Frank-Starlingの法則、循環平衡）
4. Frank-Starlingと心臓圧容積関係
5. 心室圧容積面積と消費エネルギー



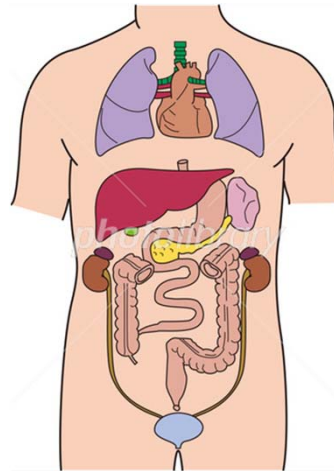
心拍出量の必要量はどう決まる？

命の設計図

単純な生命体



多臓器システム

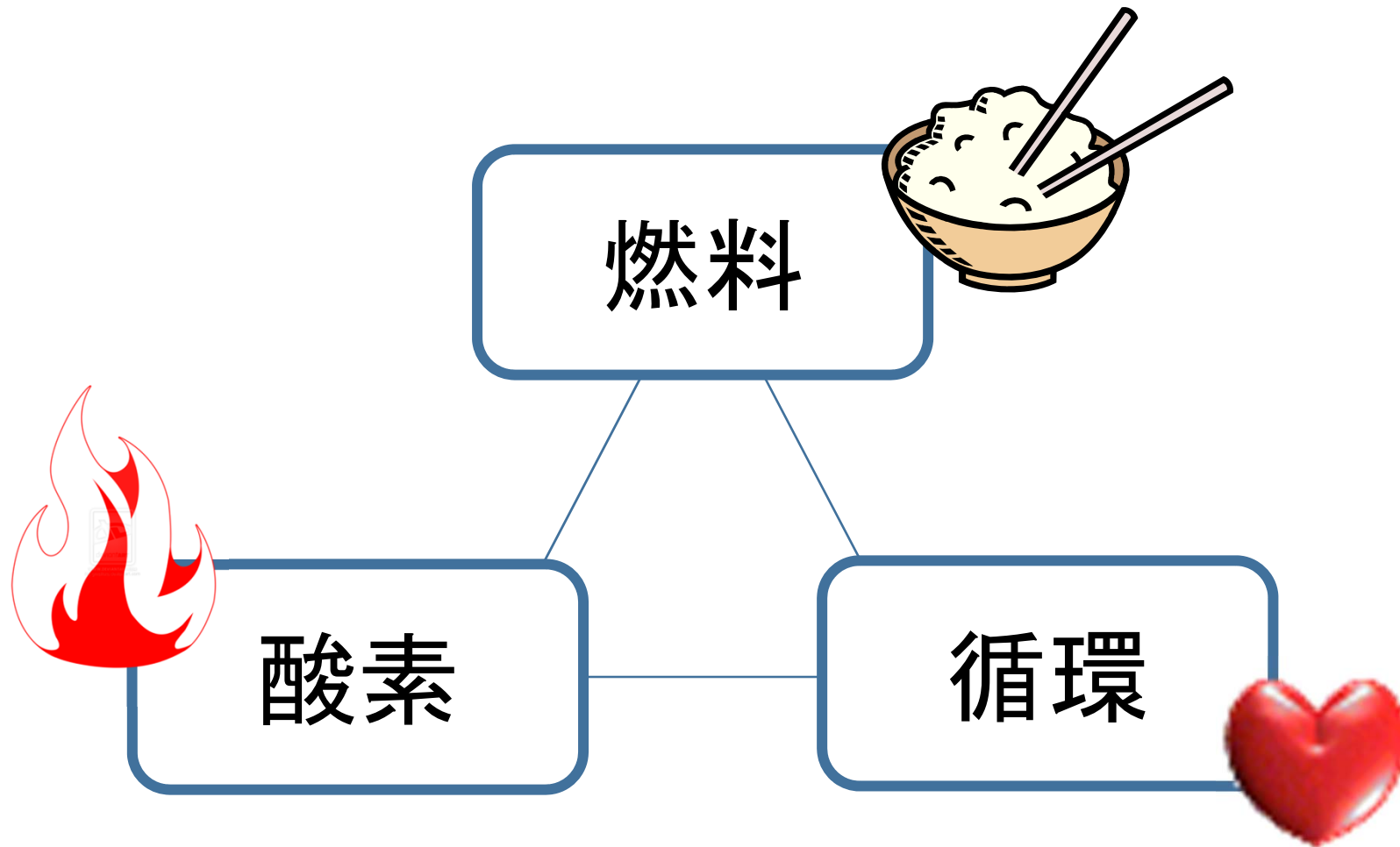


変動する要求



内部環境の恒常性維持

恒常性を支える命のトライアングル



人は何ワット

- 体重1kgでは
 25 kcal/kg/day
- $1 \text{ cal} = 4.2 \text{ J}$ なので
 $25 \times 4.2 \times 10^3 = 105 \times 10^3 \text{ J/kg/day}$
- 1日の秒数で割ると
 $105 \times 10^3 / 86400 = 1.2 \text{ W/kg}$
- 60kgの体重に換算すると
 $1.2 \times 60 = 72 \text{ W}$



燃料をエネルギーに変える酸素

- $1 \text{ ml O}_2 \approx 20 \text{ J}$
- $1.2 \times 60 / 20 \approx 3.5 \text{ ml/kg/min}$



石炭やガソリンが燃えるのと大差ない

出ました、**1 MET**



酸素を宅配する循環器系

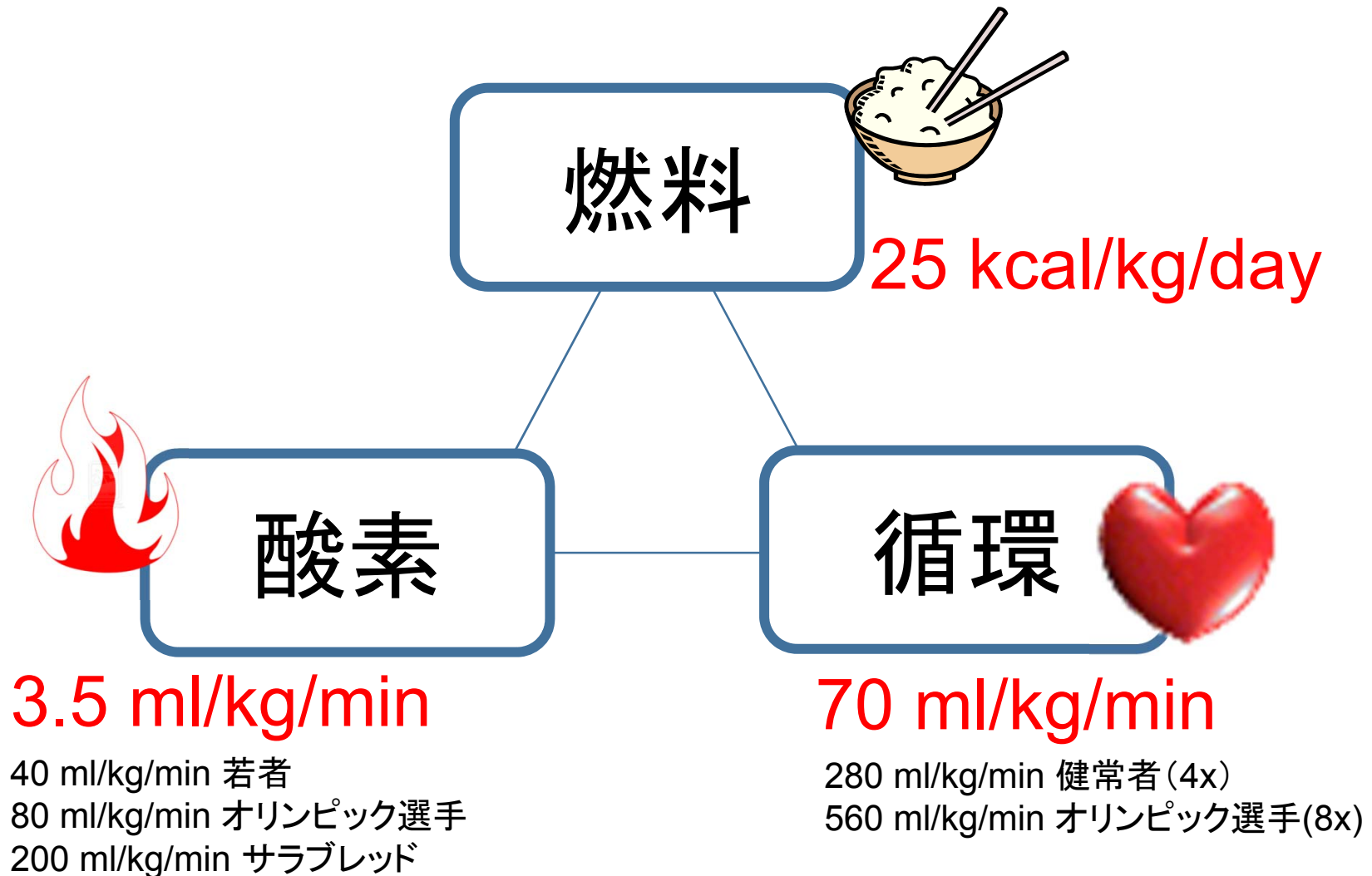
- Hb 1g は **1.34 ml**の酸素と結合
- Hb15 g/100 mlを酸素で飽和すると
 $15 \times 1.34 \approx$ **20 ml/100 ml** の酸素と結合
- $S_aO_2 =$ **100%**, $S_vO_2 =$ **75%**とすると、3.5 ml/kg/minの酸素を供給するためには

$$CO = \frac{3.5}{(1 - 0.75) \times 20} \times 100 = \text{70 ml/kg/min}$$

- 体重60 kgでは
 $CO = 70 \times 60 =$ **4.2 L/min**



命のトライアングル

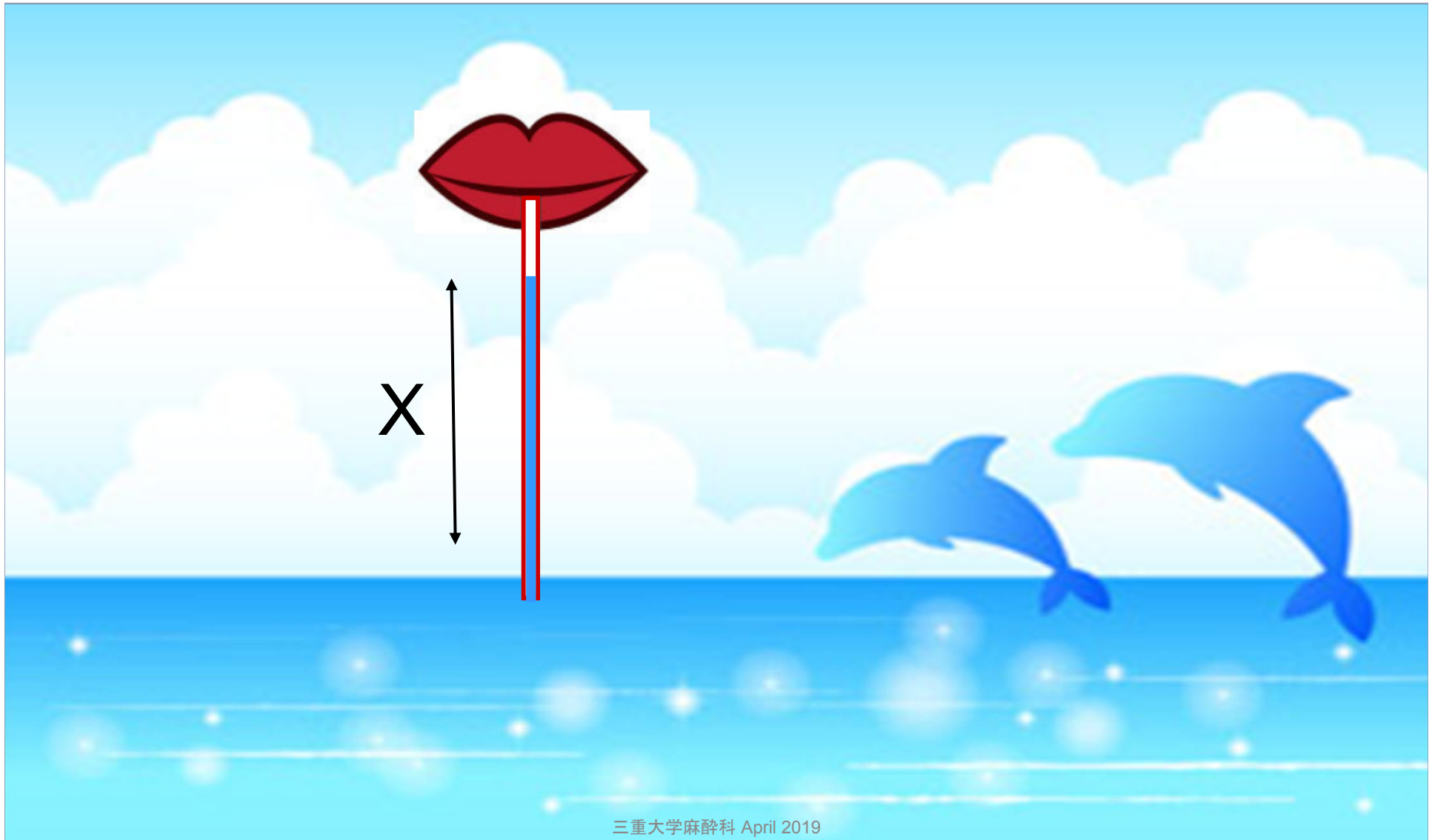


理屈で語れたら免許皆伝！
血行動態 演習問題
－心拍出量の理解編－

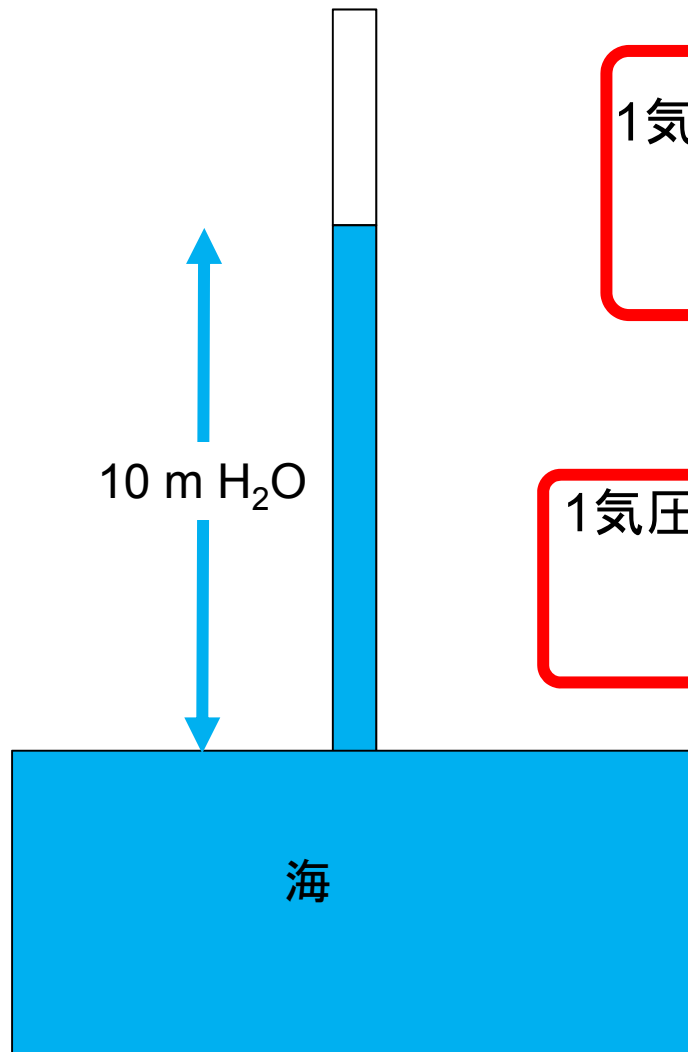
1. 10 METsの運動でCOはいくらになるでしょうか？
※ CO=Cardiac output (心拍出量)
2. 実際のCOは数倍しか増えません。どのようにして運動を維持しているのでしょうか？
3. Hbが10g/dlに低下したら、COはどうなるでしょうか？
4. COが低下したら $S_v\bar{O}_2$ はどうなるかでしょうか？

空気に押し潰される静脈

ストローで何メートルまで吸い揚がるか

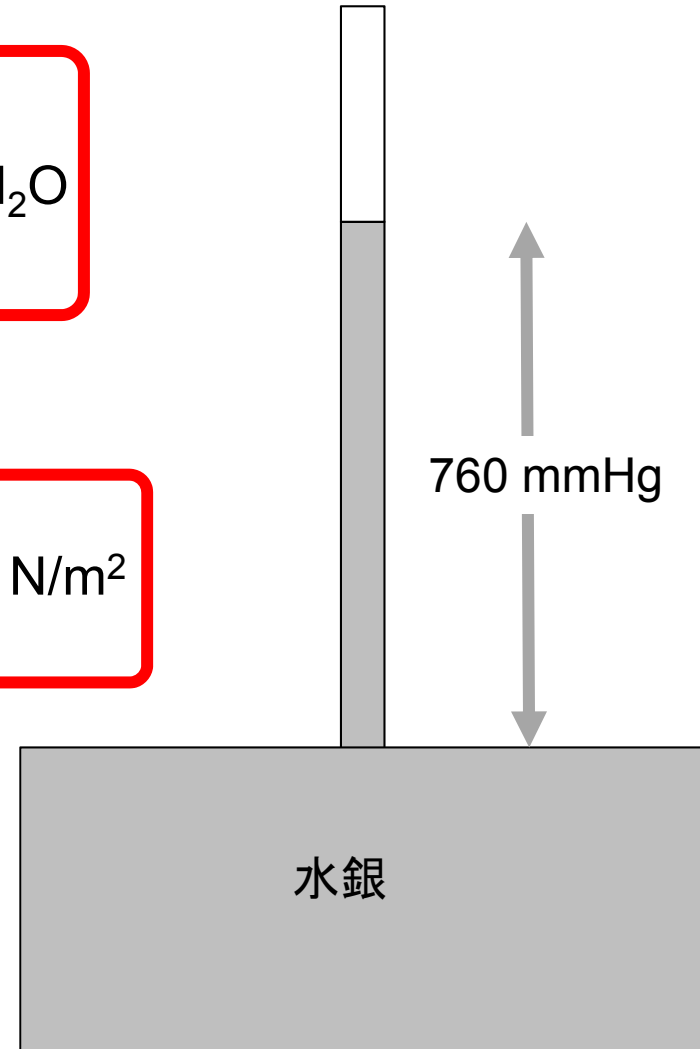


水銀と水

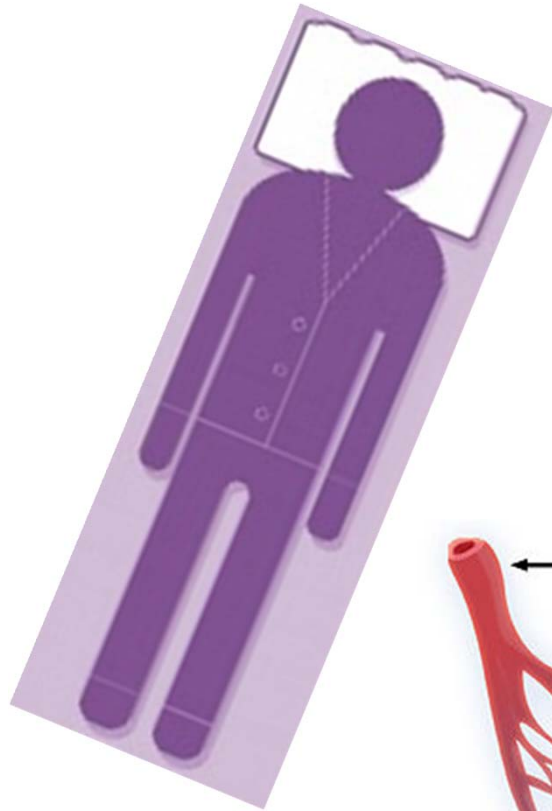


$$\begin{aligned} 1 \text{ 気圧} &= 13.6 \times 760 \\ &= 10,336 \text{ mm H}_2\text{O} \\ &= 10 \text{ m H}_2\text{O} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 1 \text{ 気圧} &= 1.0336 \text{ kg} \\ &= 1.0336 \times 9.8 \times 10^4 \text{ N/m}^2 \\ &= 1013 \text{ hPa} \end{aligned}$$



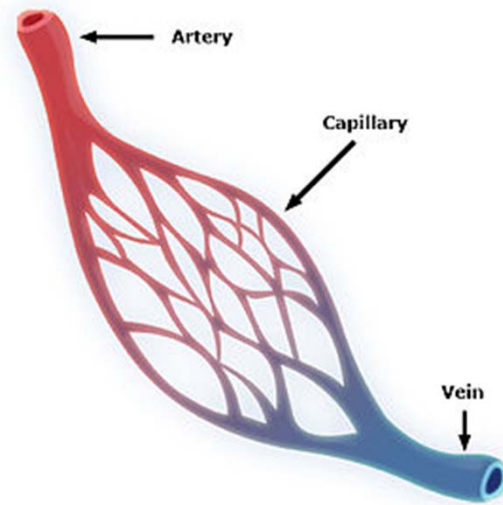
大気圧で押し潰される静脈



大気圧 $\approx 1.0 \text{ kg/cm}^2$

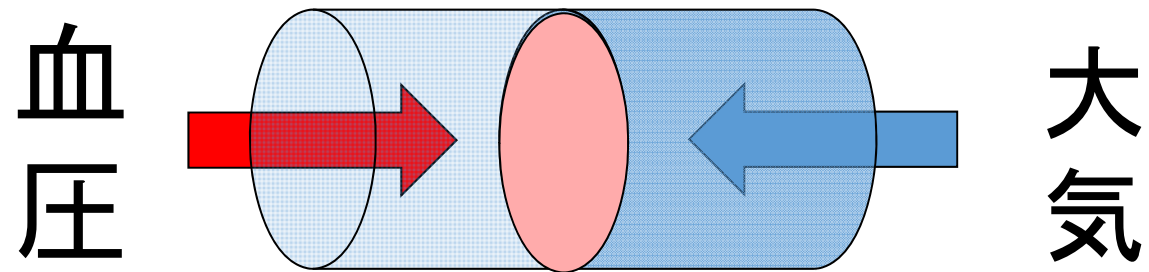
体表面積 $= 170 \times 50 = 8,500 \text{ cm}^2$

押さえ力 $= 8,500 \times 1 = 8500 \text{ kg} = 8.5 \text{ ton}$



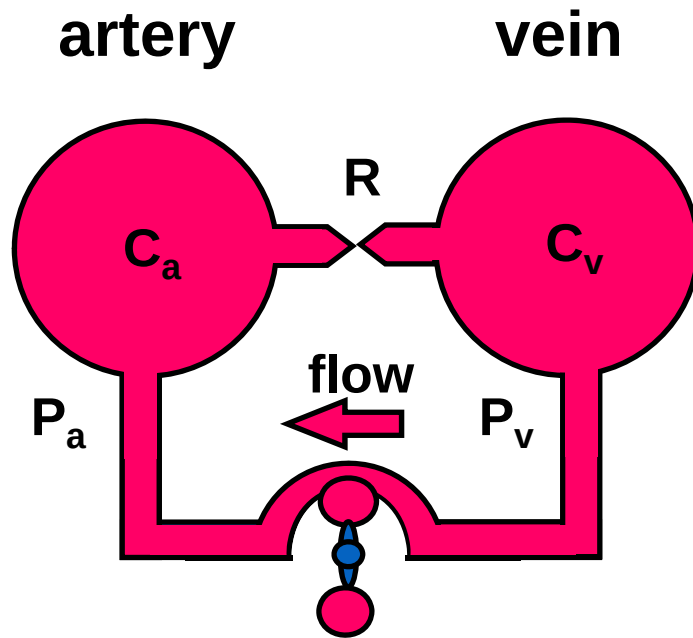
- 血管内圧 $>$ 大気圧でないと、血管は押し潰され血流途絶は必定！
- 実質的に静脈圧はほぼゼロ

血圧の測定原理

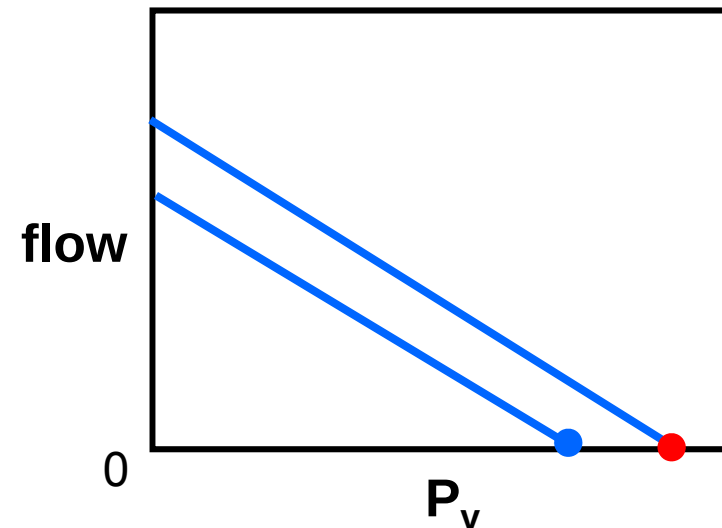
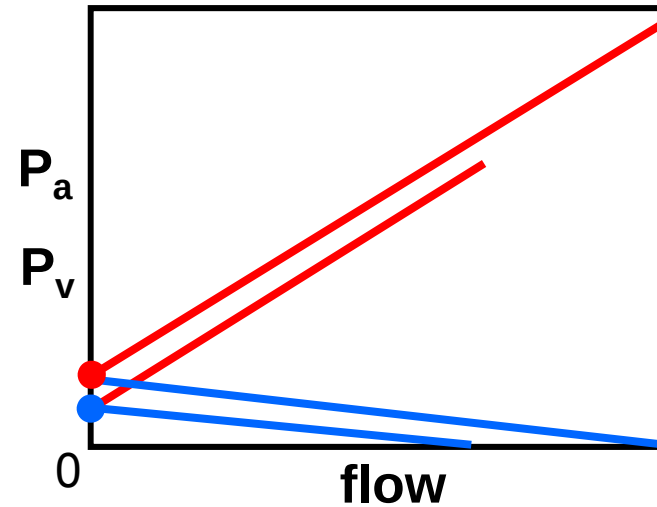


- センサーには大気圧を測定するための空気孔があり、圧較差を測定
- 大気側を真空にすれば絶対圧測定可

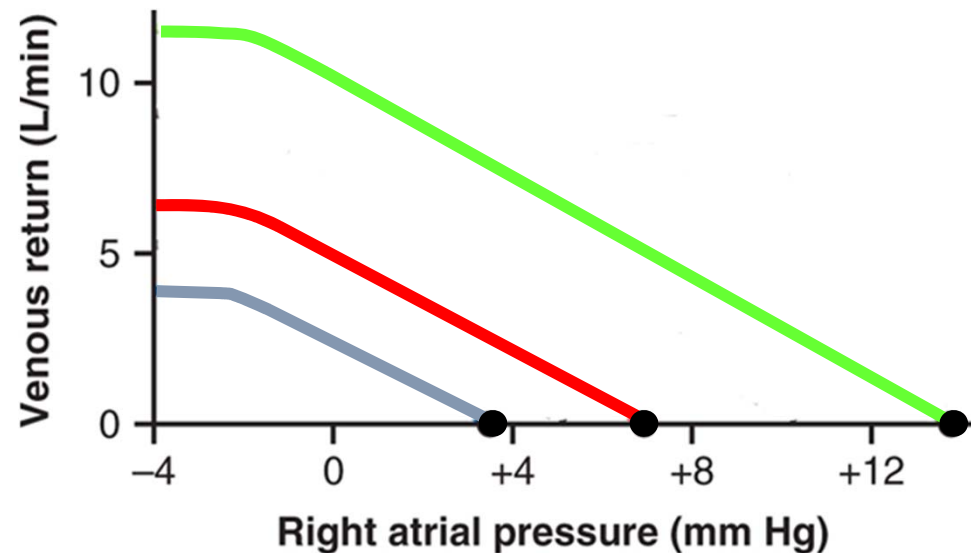
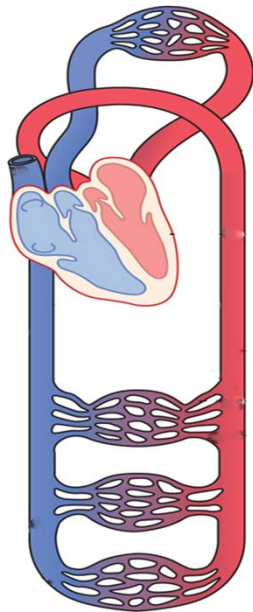
思考実験：血液量、心拍出量、血压



平均循環充滿圧: mean circulatory filling pressure (P_{mcf})
平均体循環充滿圧 mean systemic filling pressure (P_{msf})



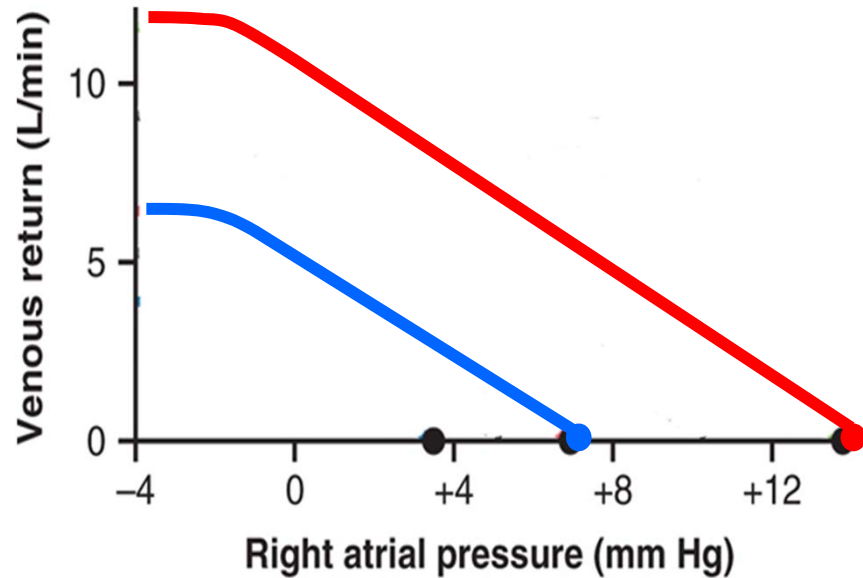
静脈還流は有効血液量で決まる



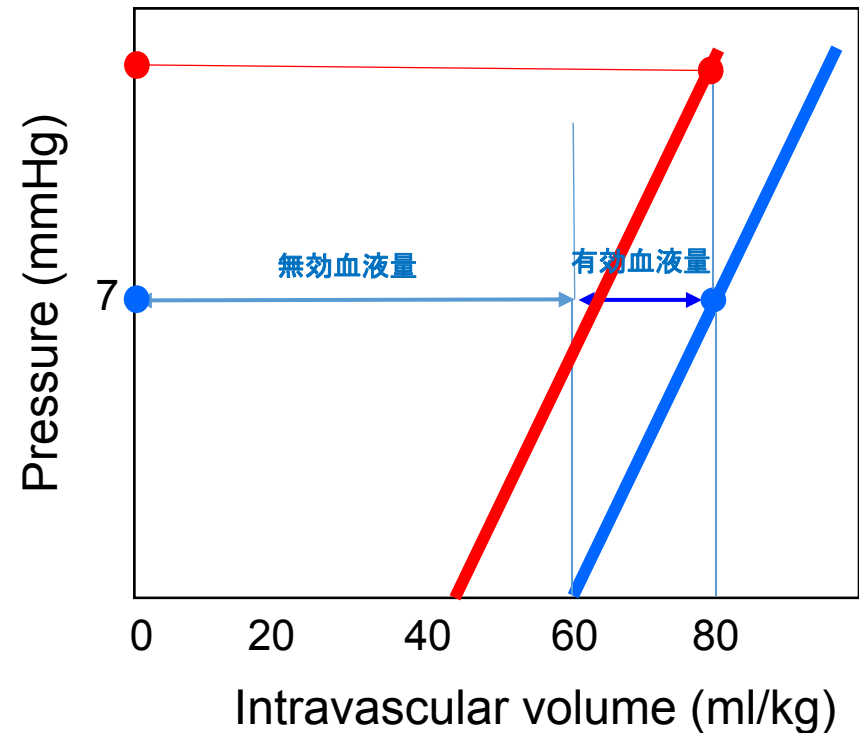
Hall: Guyton and Hall Textbook of Medical Physiology, 12th Edition
Copyright © 2011 by Saunders, an imprint of Elsevier, Inc. All rights reserved.

最大還流量は有効血液量で確定。

有効血液量と無効血液量



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



- 血液量を増やすことで有効血液量増加
- 交感神経活動の亢進で有効血液量増加

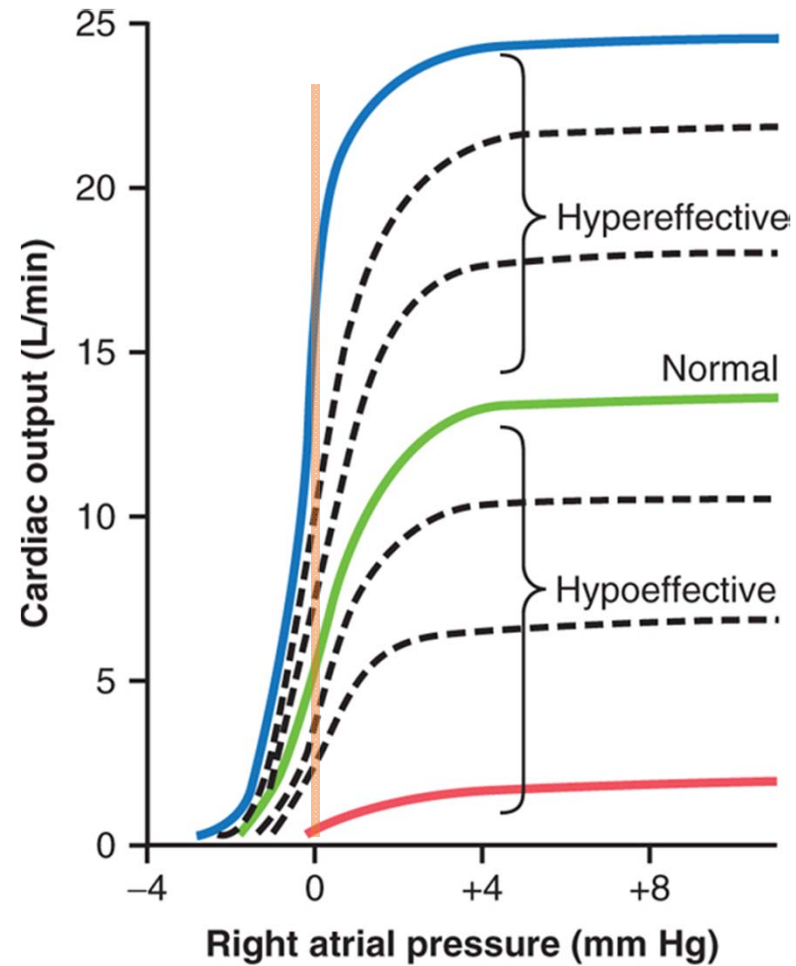
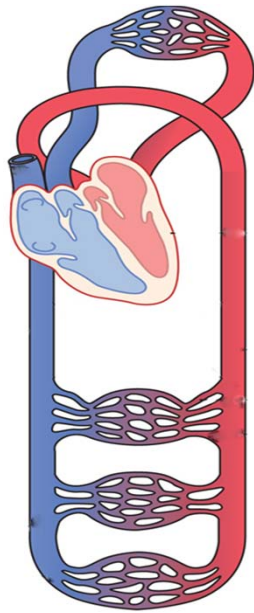
理屈で語れたら免許皆伝！
血行動態 演習問題
－ 静脈還流の理解編 －

1. 静脈圧を変えずに静脈還流を増やすにはどうすればよいでしょうか？
2. 交感神経の緊張は血管床を収縮させ無効血液量を減らします。有効血液量および平均循環充満圧はどうなるでしょうか？
3. 運動中はCOは増加するが静脈圧は殆ど変わらない。なぜでしょうか？

心拍出量を生み出す仕組み

心臓（心胸部）のポンプ機能

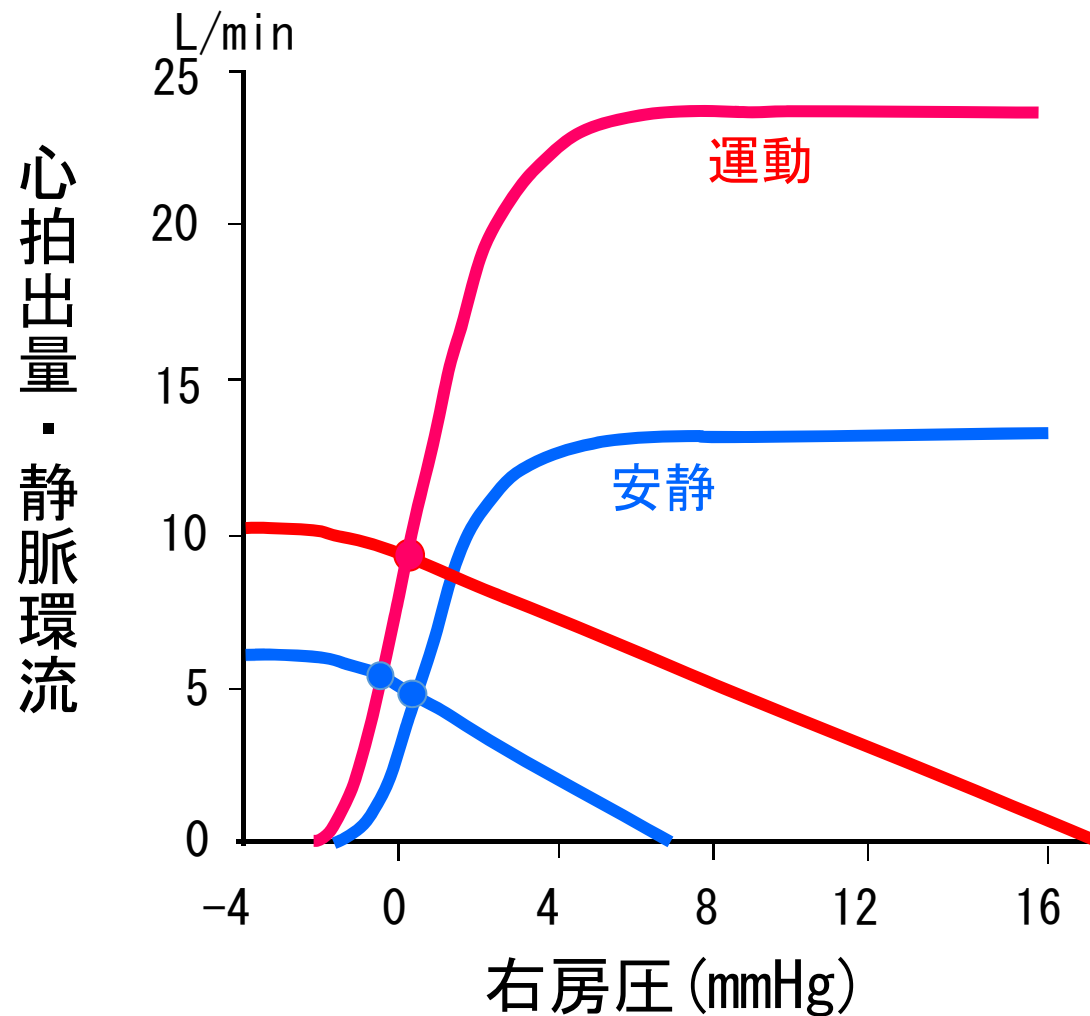
Frank-Starlingの法則



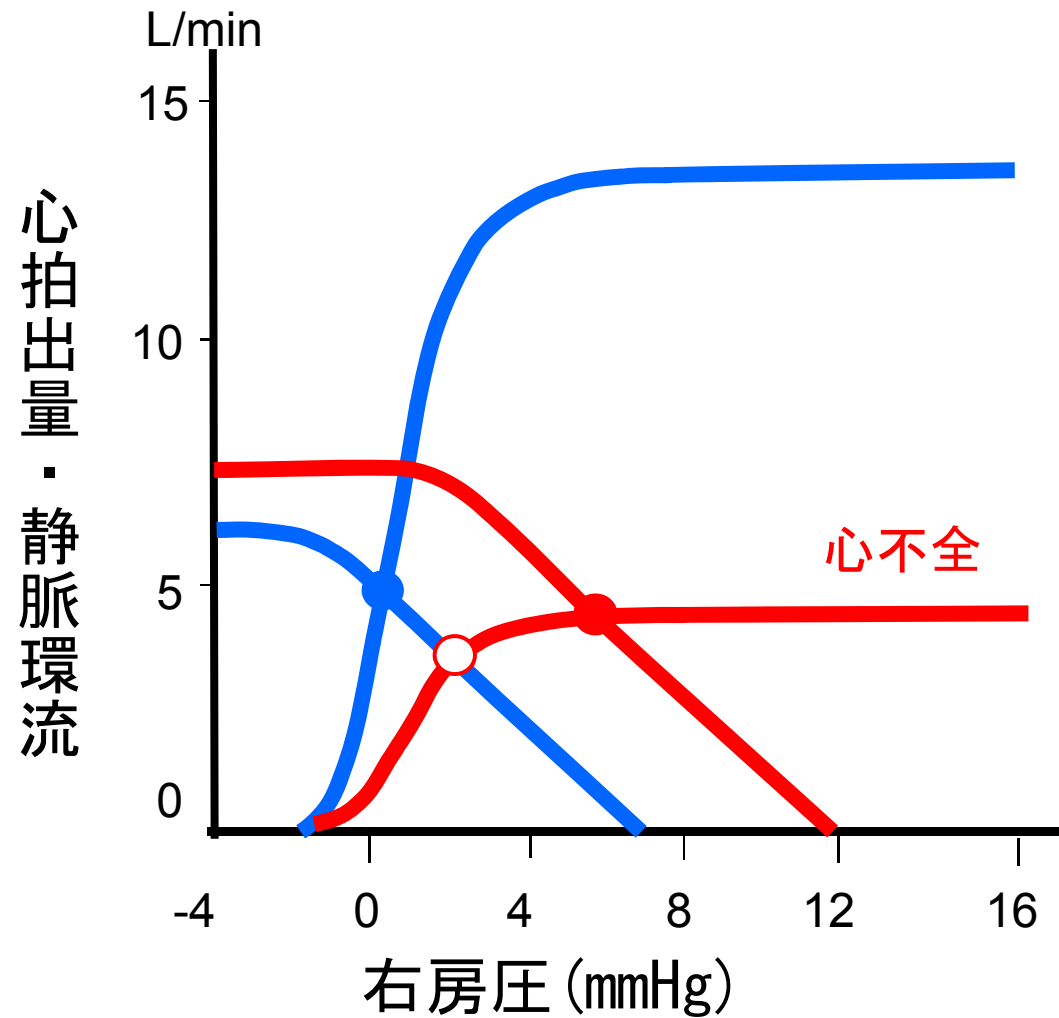
Hall: Guyton and Hall Textbook of Medical Physiology, 12th Edition
Copyright © 2011 by Saunders, an imprint of Elsevier, Inc. All rights reserved.

循環平衡：心拍出量は血管が決める

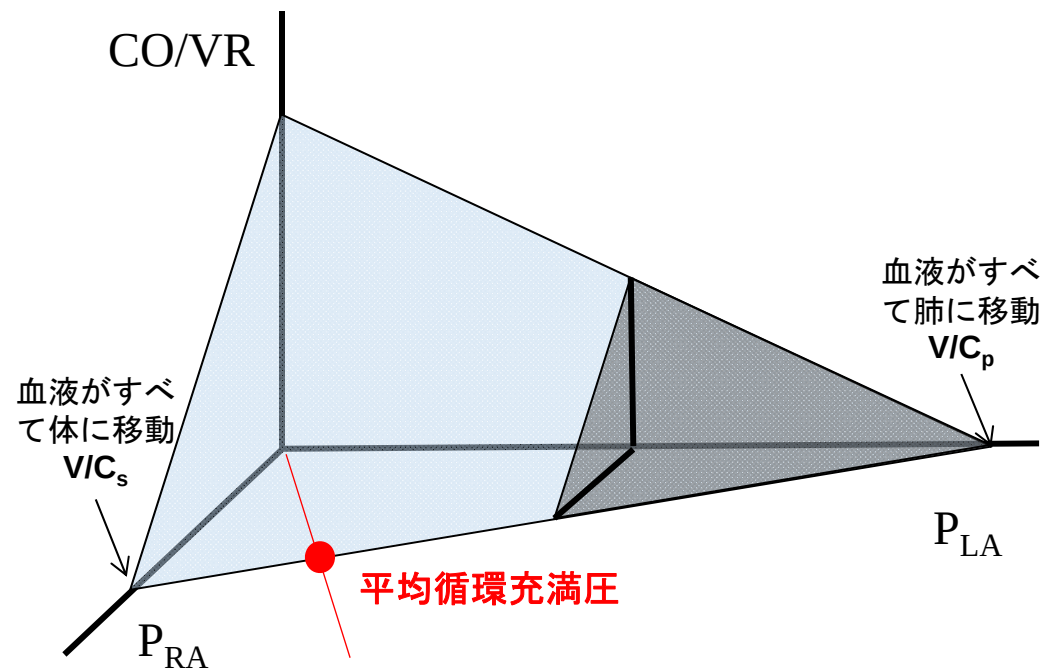
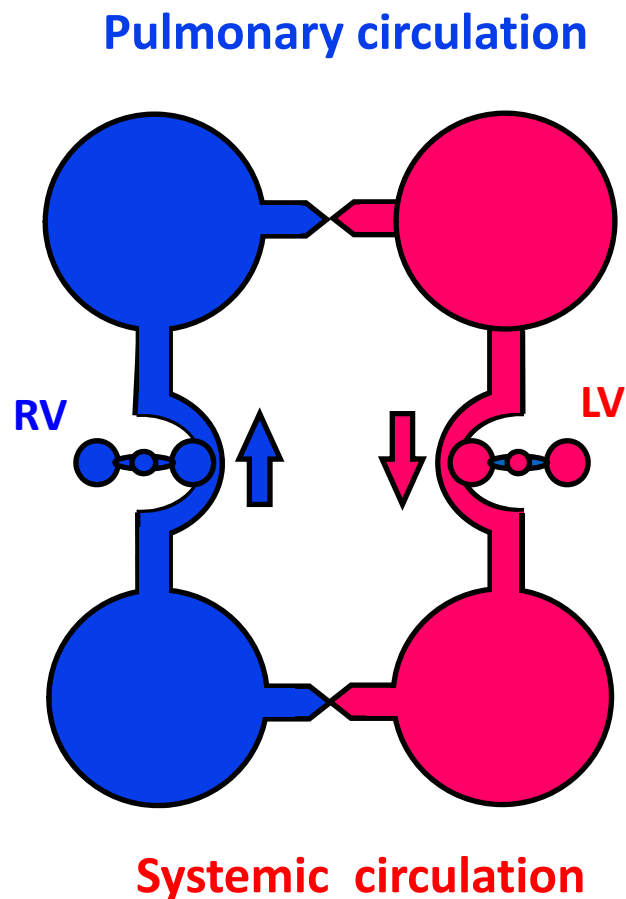
心機能が亢進してもCOは増えない



不全心の心拍出量は心臓が決める



静脈環流を体循環、肺循環に拡張



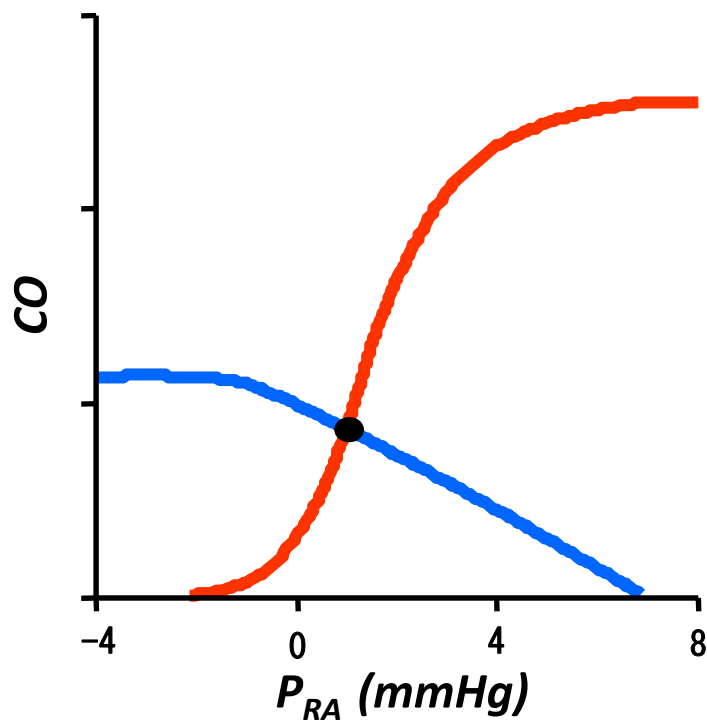
- 静脈環流は平面 (VR surface)
- 有効血液量によって上下に移動

Sunagawa K. J Physiol Sci. 2017 Jul;67(4):447-458. Guyton's venous return curves should be taught at medical schools.¹.

Uemura K et al., Am J Physiol. 2005

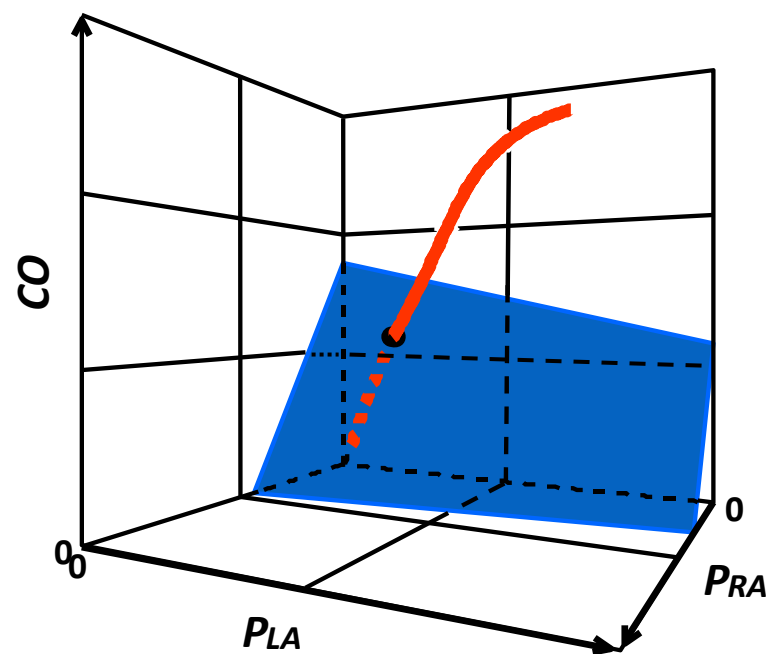
一般化循環平衡の優位性

CO curve and VR curve
(Guyton)



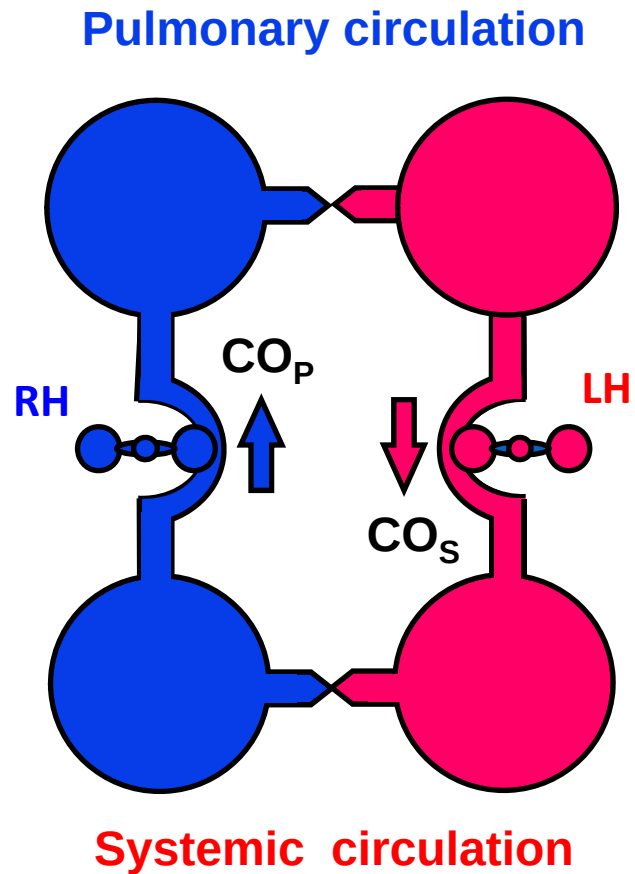
左心不全の評価不可

CO curve and VR surface
(extended Guyton)

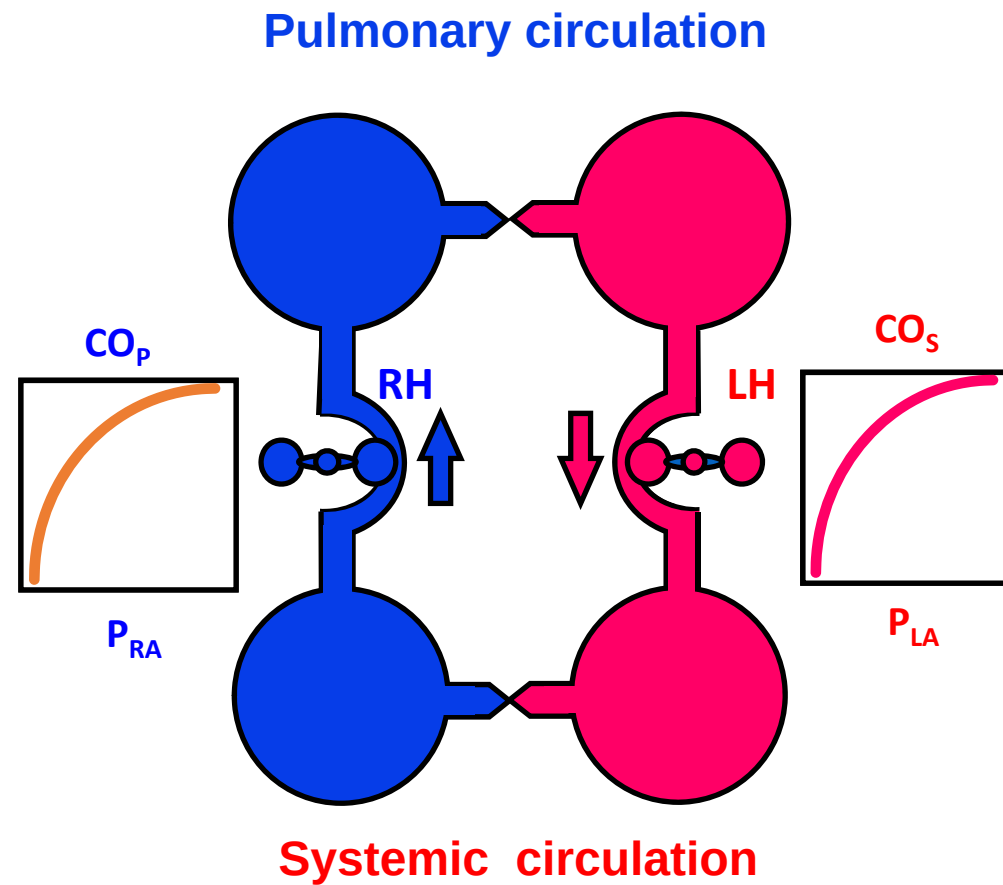


分離して心不全評価可

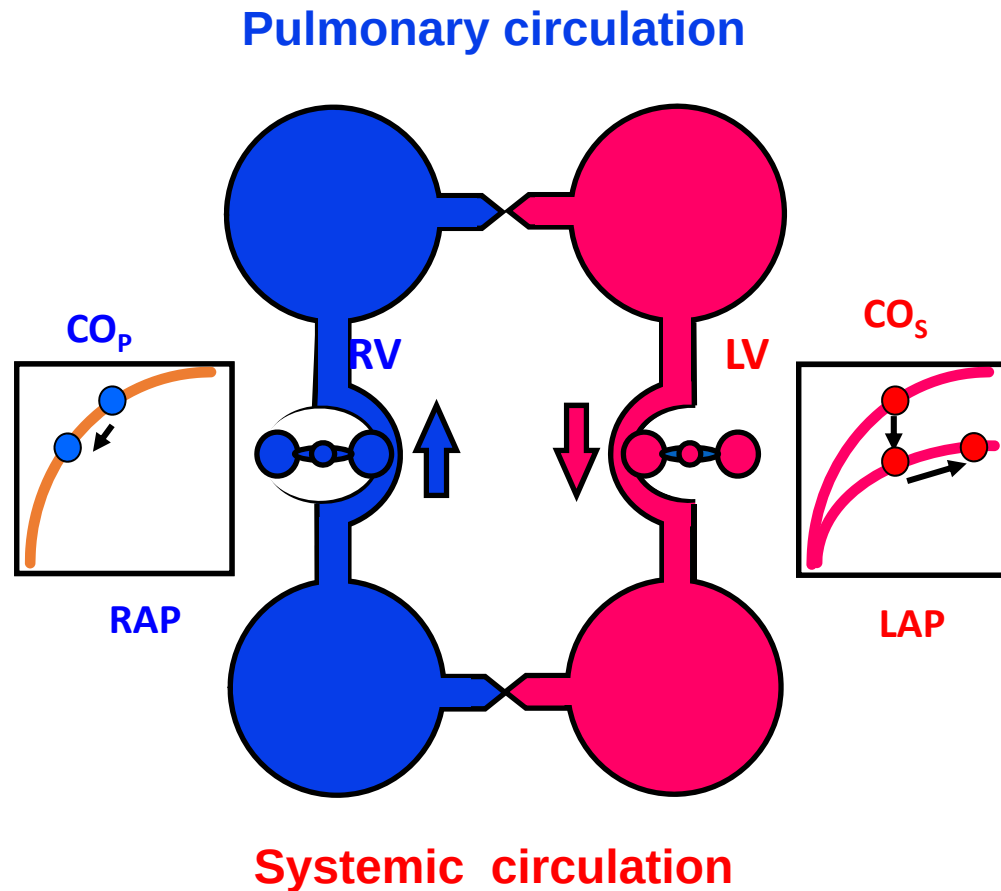
なぜ左右の心拍出量は等しい？



Frank-Starling の法則



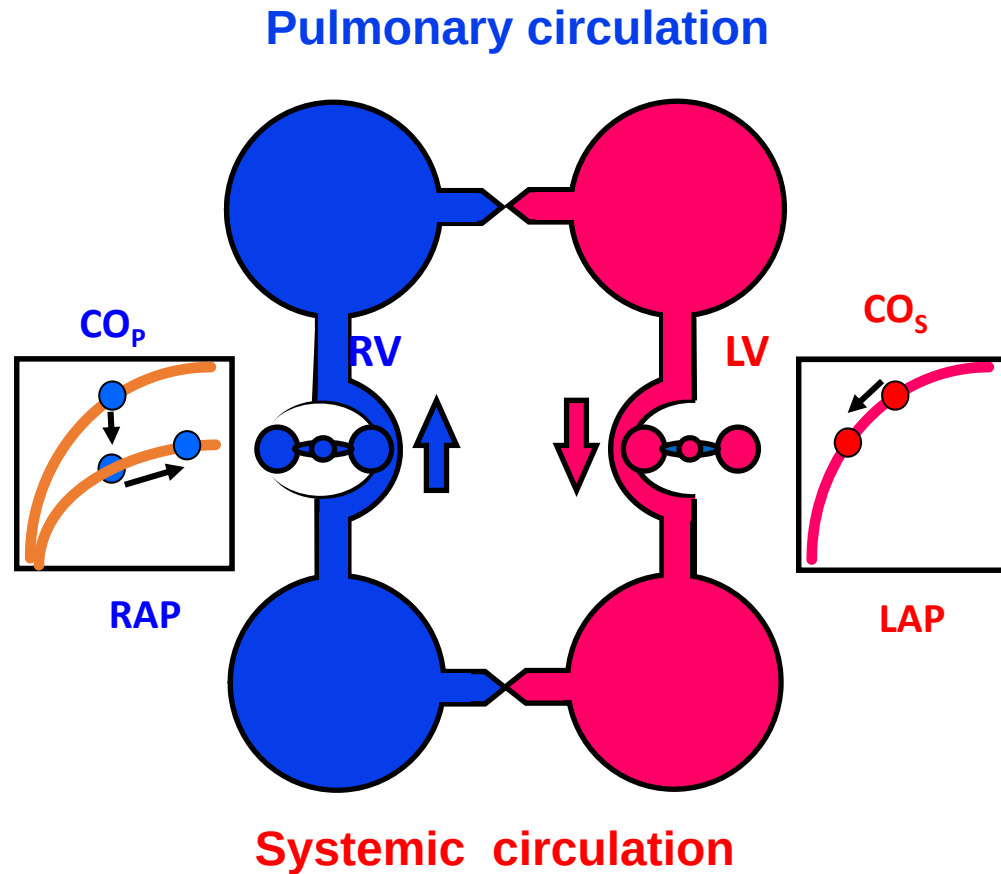
左心不全



1. LV dysfunction
2. Decreases in COs
3. Increases in LV preload and decreases in RV preload
4. Increases in COs and decreases in COp
5. Blood shift from systemic to pulmonary circulation until COs and COp match
6. Decreases in CO with pulmonary congestion



右心不全

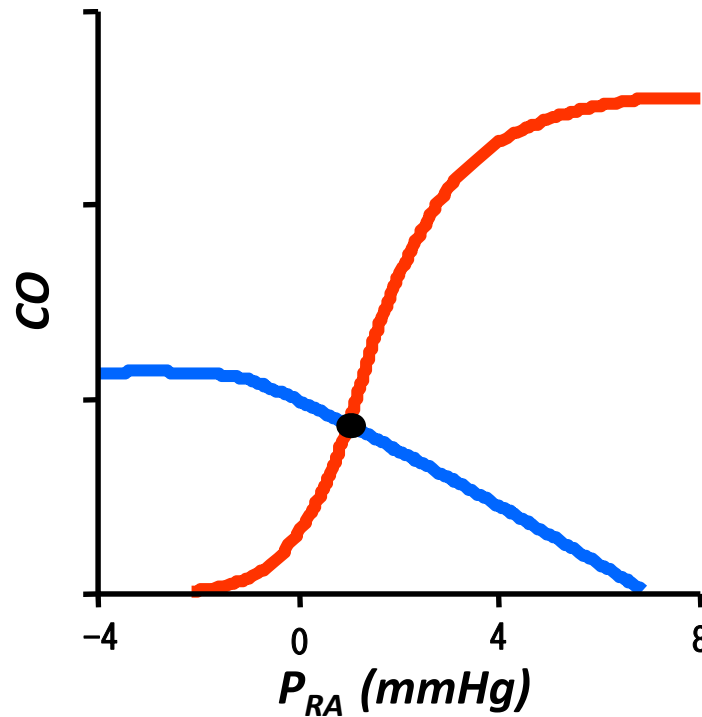


1. RV dysfunction
2. Decreases in CO_p
3. Increases in RV preload and decreases in LV preload
4. Increases in CO_p and decreases in CO_s
5. Blood shift from pulmonary to systemic circulation until CO_s and CO_p match
6. Decreases in CO with systemic congestion

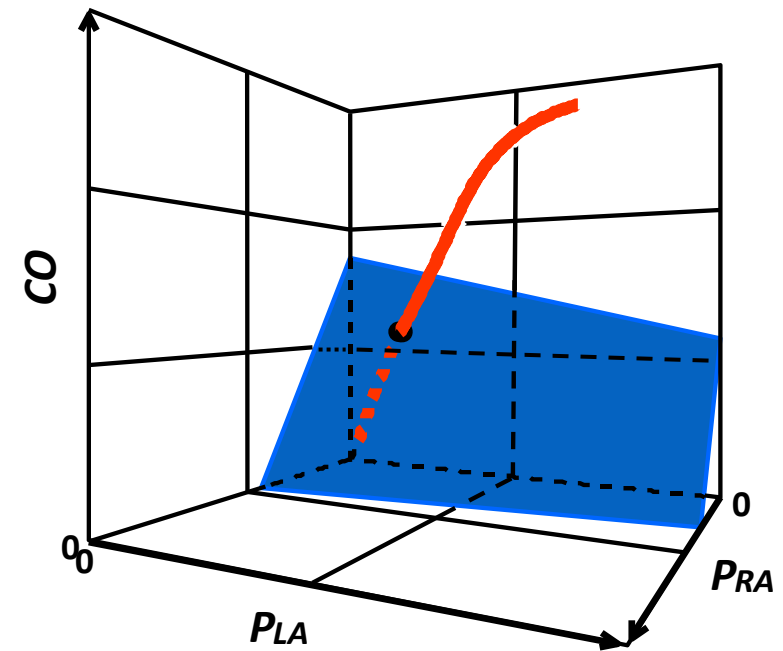


一般化循環平衡の概念

CO curve and VR curve
(Guyton)



CO curve and VR surface
(extended Guyton)



- 病態も含めて血行動態の殆どは循環平衡で理解可能
- 心拍出量曲線の決定因子がexplicitでない

理屈で語れたら免許皆伝！

血行動態 演習問題

－循環平衡の理解編－

1. 血管床のコンプライアンスがおおよそ3 ml/mmHg/kg、平均循環充満圧=7 mmHgだとすると、有効血液量はいくらになるでしょうか？
2. 体重60 kgの患者の出血量が360 mlになりました。輸液や代償機構が働かなければ平均循環充満圧はいくらになるでしょうか？
3. 圧反射は血圧を感知して交感神経活動を変え、圧反射だけで平均循環充満圧 3 mmHg程度は即時的に変えることができます。この症例で圧反射が働くと有効血液量はどのように代償されるのでしょうか？。
4. 左心室の心筋梗塞では、心機能の低下は小さくなくても容易に肺水腫を起こします。一方、拡張型心筋症等ではEFが20－30%程度まで低下しても必ずしも肺水腫になりません。なぜでしょうか？