

心臓が操る 血圧と静脈圧と心拍出量の三角関係

原理から考える
楽しむ血行動態



九州大学

循環器病未来医療研究センター

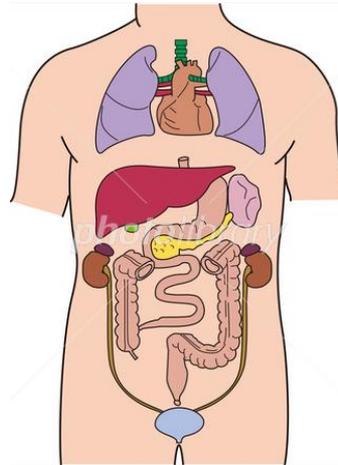
砂川賢二

原理から考える進化を支えた仕組み

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

嘘っぽいけど本当の話



原理から考える循環器

1. 心拍出量の必要量は食事量で決まる
2. 圧容積関係で理解できる血圧・静脈圧・心拍出量の三角関係
3. 心拍出量を決めない正常心
4. 良い心臓は前負荷依存、悪い心臓は後負荷依存
5. 自律神経応答の功罪

心拍出量の必要量は食事量で決まる

そ、そんな馬鹿な

摂取量



=
?

心拍出量



だけど

それでは種明かし

エネルギーは保存される



燃料



25 kcal/kg/day

$O_2/ml \approx 20J = 4.8cal$

$$\frac{25 \cdot 10^3}{24 \cdot 60 \cdot 4.8} \approx 3.5$$



酸素

循環



1MET = 3.5 ml/kg/min (1.17W/kg)

60 kg: 210ml/min, 70W

人は電球やノートPC程度のエネルギーが必要



=

60~70 W



酸素を宅配する循環器

- Hb 1g は **1.34 ml**の酸素と結合
- Hb15 g/100ml を酸素で飽和すると
15x1.34 ≈ **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

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

- 体重60kgでは
CO=70x60= **4.2 L/min**



簡単です！

COは $MVO_2 \cdot H_b$ 濃度 $\cdot \Delta SO_2$ と固定した関係 (Fickの原理)

代謝

$$CO = \frac{MVO_2}{\Delta S_{O_2} \cdot C_{O_2}} \times 100$$

貧血

$$\Delta S_{O_2} = \frac{MVO_2}{CO \cdot C_{O_2}} \times 100$$

心拍
出量



マラソン選手は一般人より速く、 馬はマラソン選手よりも速い



燃料



25 kcal/kg/day
(労作、代謝、体温)



酸素

3.5 ml/kg/min

40 ml/kg/min 若者(11METs)
80 ml/kg/min オリンピック選手(23METs)
200 ml/kg/min サラブレッド(57METs)

循環

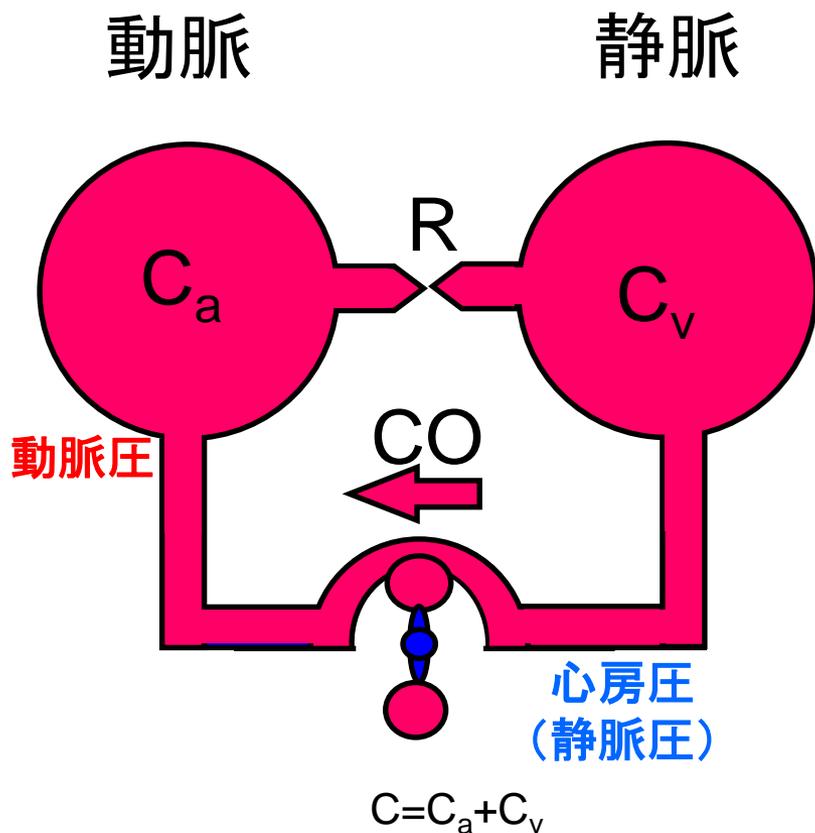


70 ml/kg/min

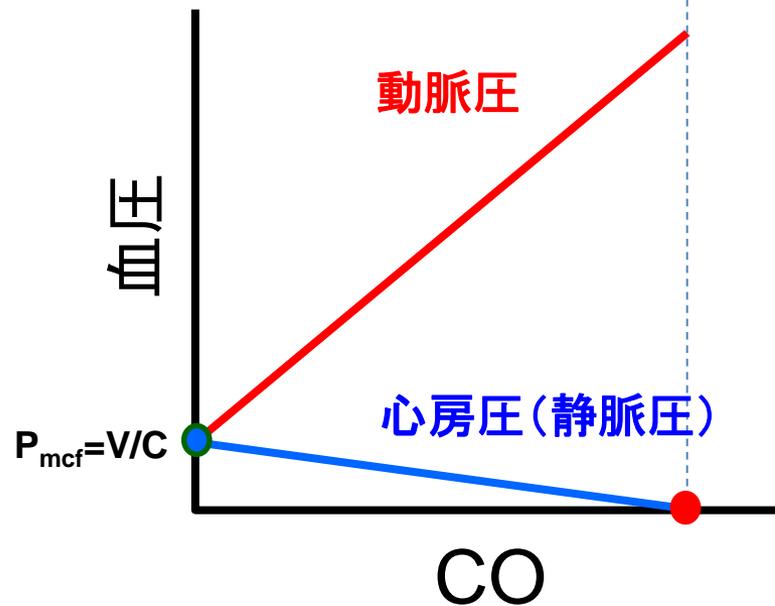
280 ml/kg/min 健常者(4x)
560 ml/kg/min オリンピック選手(8x)

血流に伴い変化する動脈圧と静脈圧

ポンプと血管の分離



動静脈圧と血流関係



$$P_a = R(C_v/C) \cdot CO + P_{mcf}$$

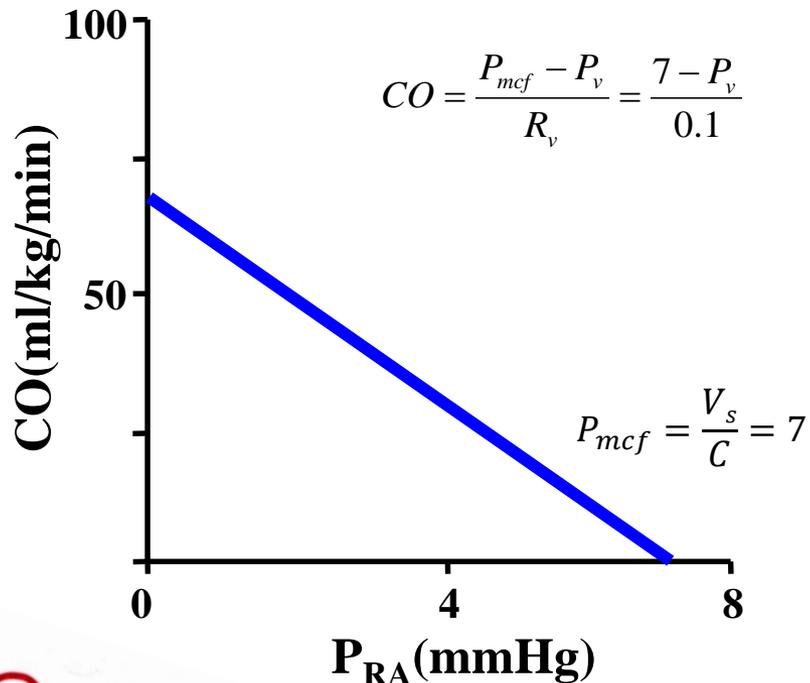
$$P_v = -R(C_a/C) \cdot CO + P_{mcf}$$

$$P_a - P_v = R \cdot CO$$

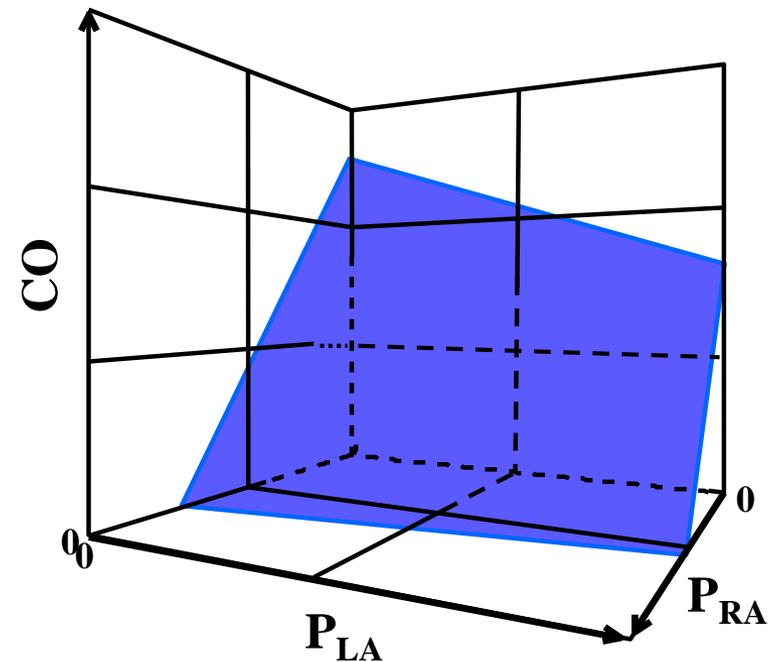
Guyton, 1973

静脈還流とその一般化

体循環のみ (Guyton)

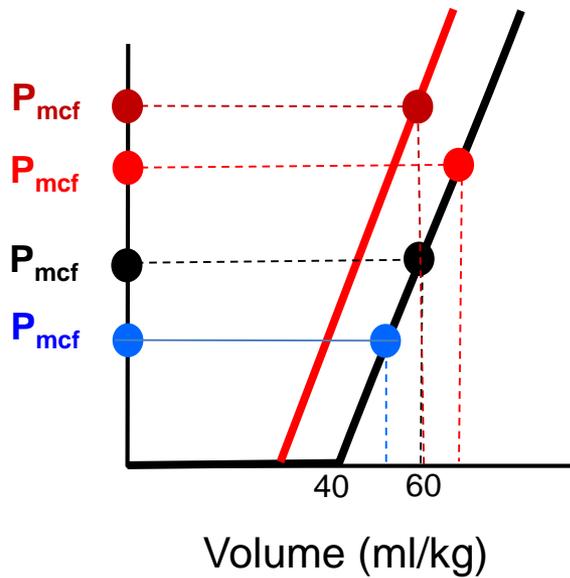


体+肺循環 (一般化)

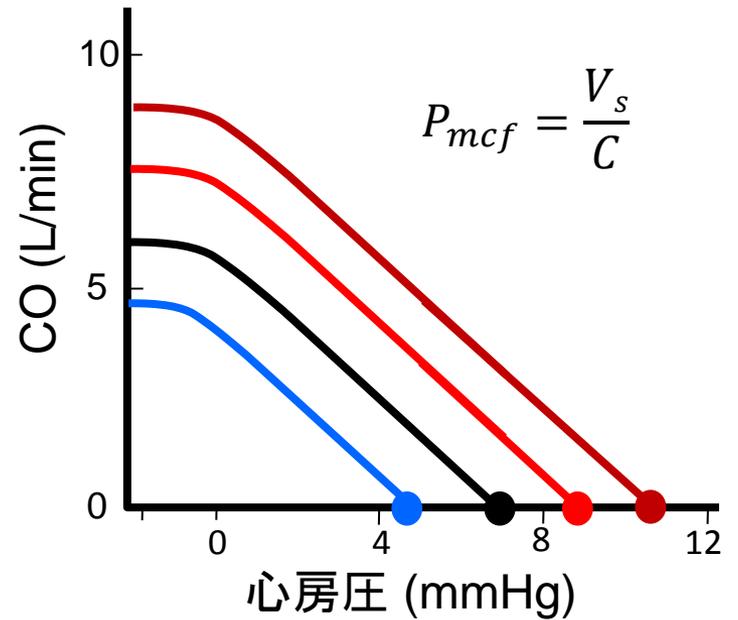


有効血液量と交感神経

全循環圧容積関係



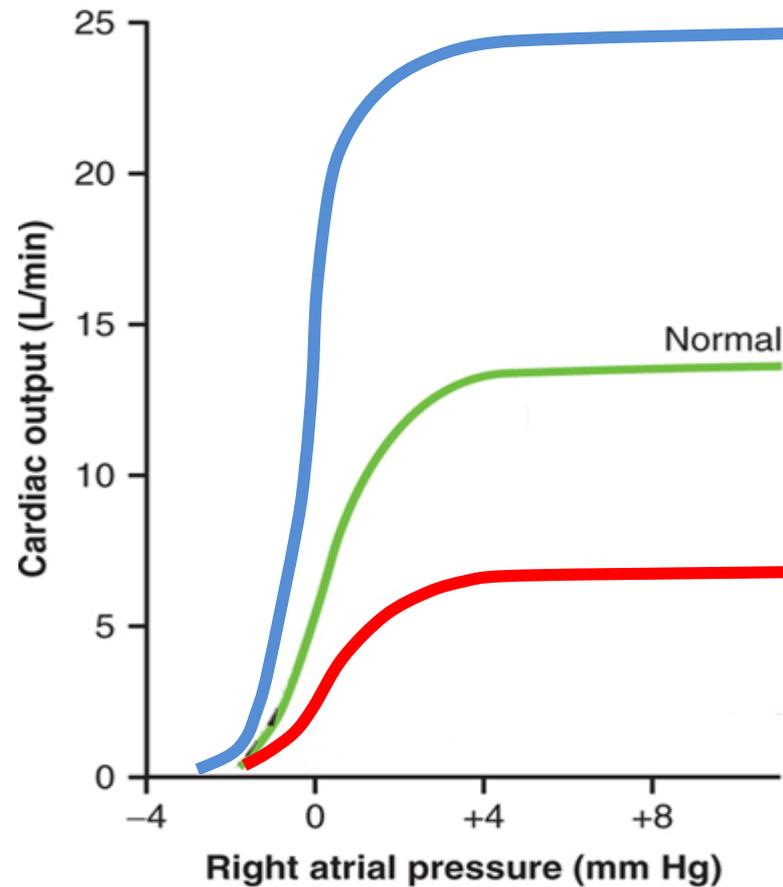
静脈還流曲線



Guyton, 1973

できましたFrank-Starlingの法則

良い心臓は前負荷依存

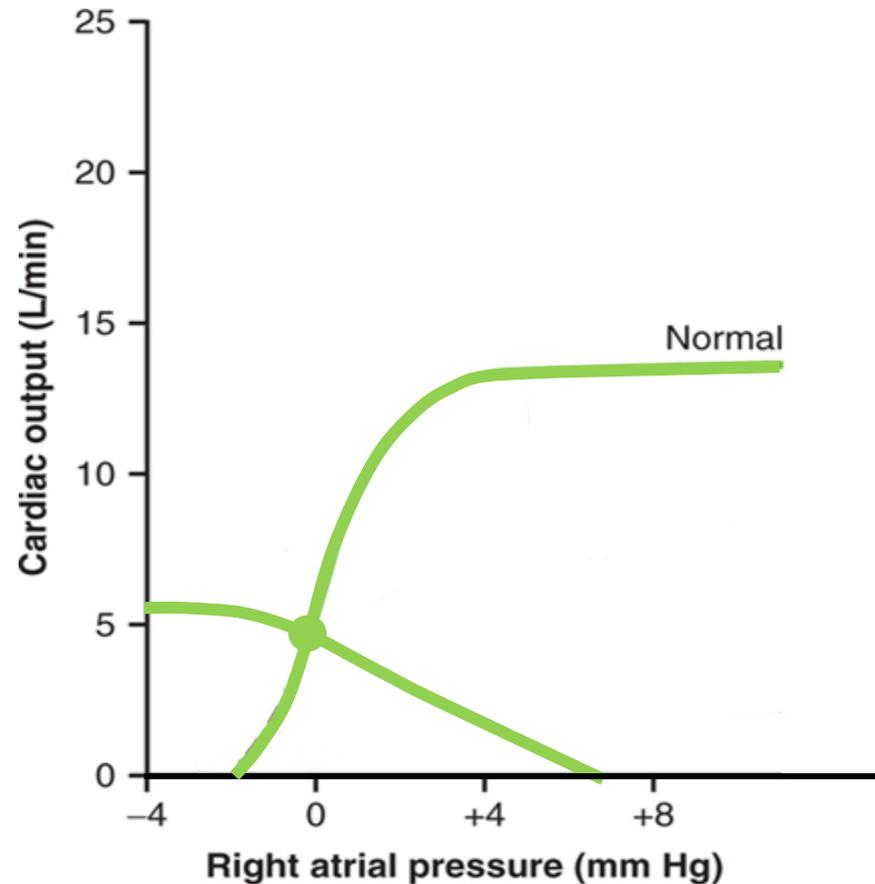


Otto Frank, 1898
Ernest Starling, 1912



三角関係を解消する循環平衡

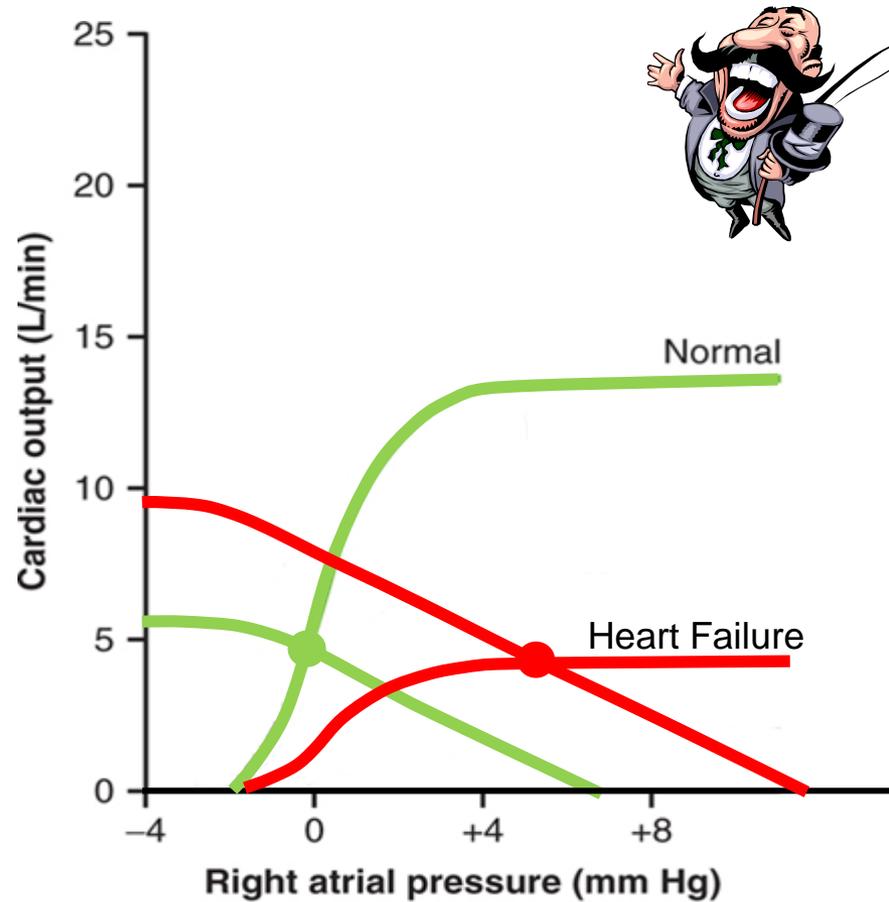
静脈還流と心拍出量は一致



Guyton et al., 1973

心臓が心拍出量を決める心不全

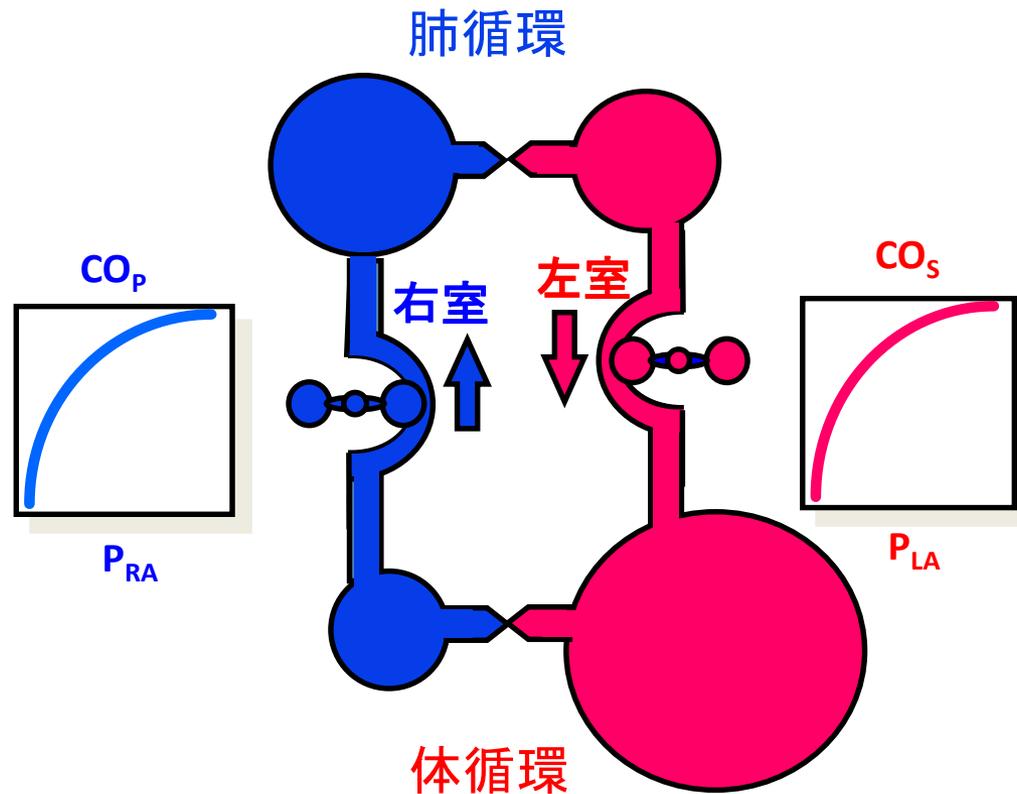
心臓が決める心拍出量



Guyton et al., 1973

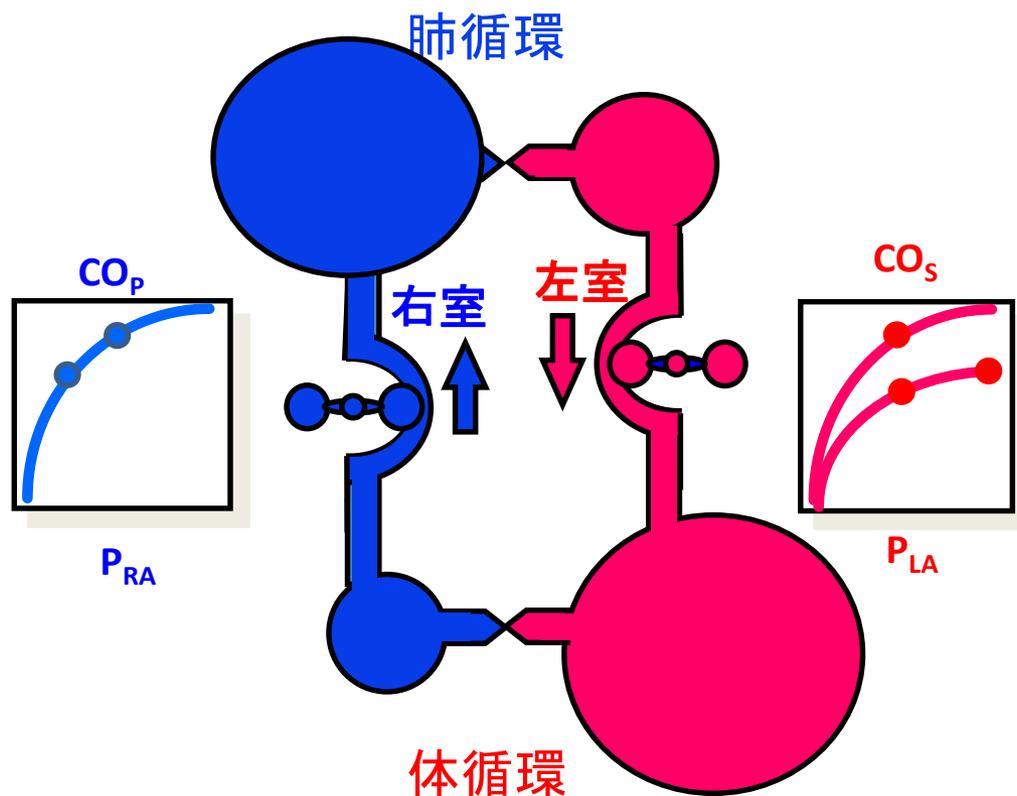
Frank-Starling の法則の意義

左右心の心拍出量を一致させる



即時の肺鬱血、遅延する体鬱血

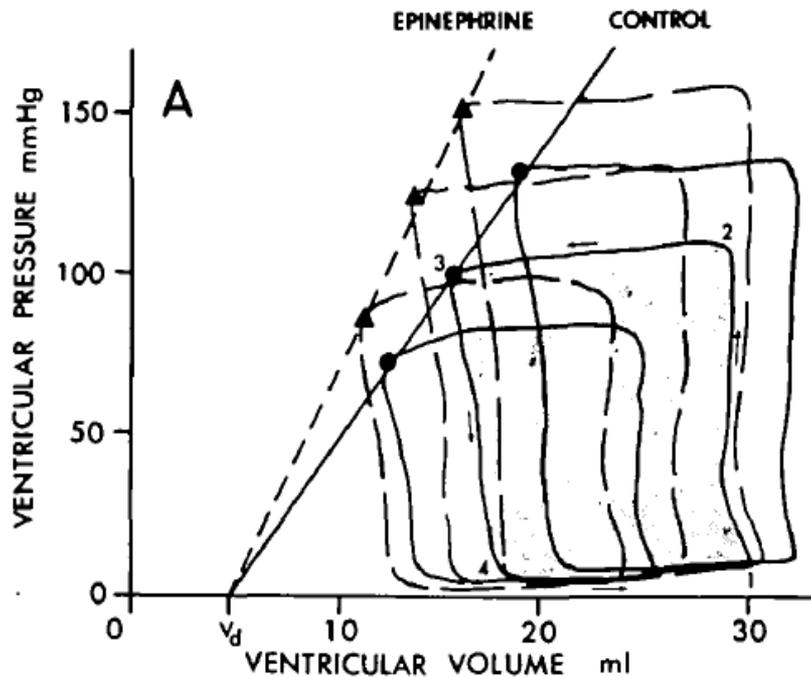
1:6



圧容積関係による心室動脈結合

心臓の圧容積関係

$$P_{es} = E_{es}(V_{es} - V_0)$$



Suga H et al. Circ Res 1973

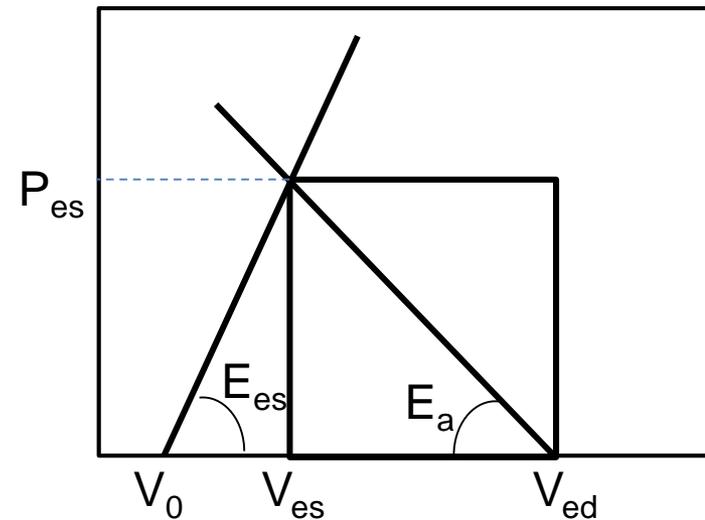
動脈の圧容積関係

$$P_{es} = E_{es}(V_{ed} - SV - V_0)$$

$$P_{es} \approx P_m$$

$$= R \cdot F = R \cdot SV / T = E_a SV$$

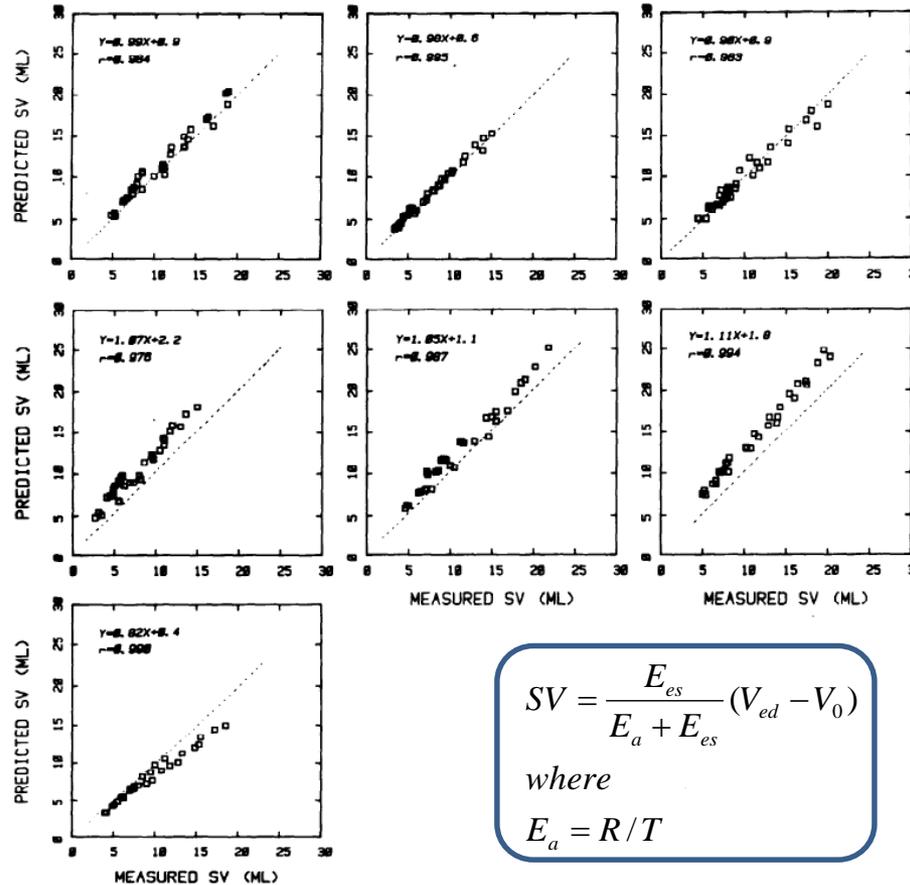
$$SV = \frac{E_{es}}{E_{es} + E_a}(V_{ed} - V_0)$$



Sunagawa K et al., Am J Physiol 1983

極めて高い推定精度

圧容積関係でSVの推定可能



$$SV = \frac{E_{es}}{E_a + E_{es}} (V_{ed} - V_0)$$

where

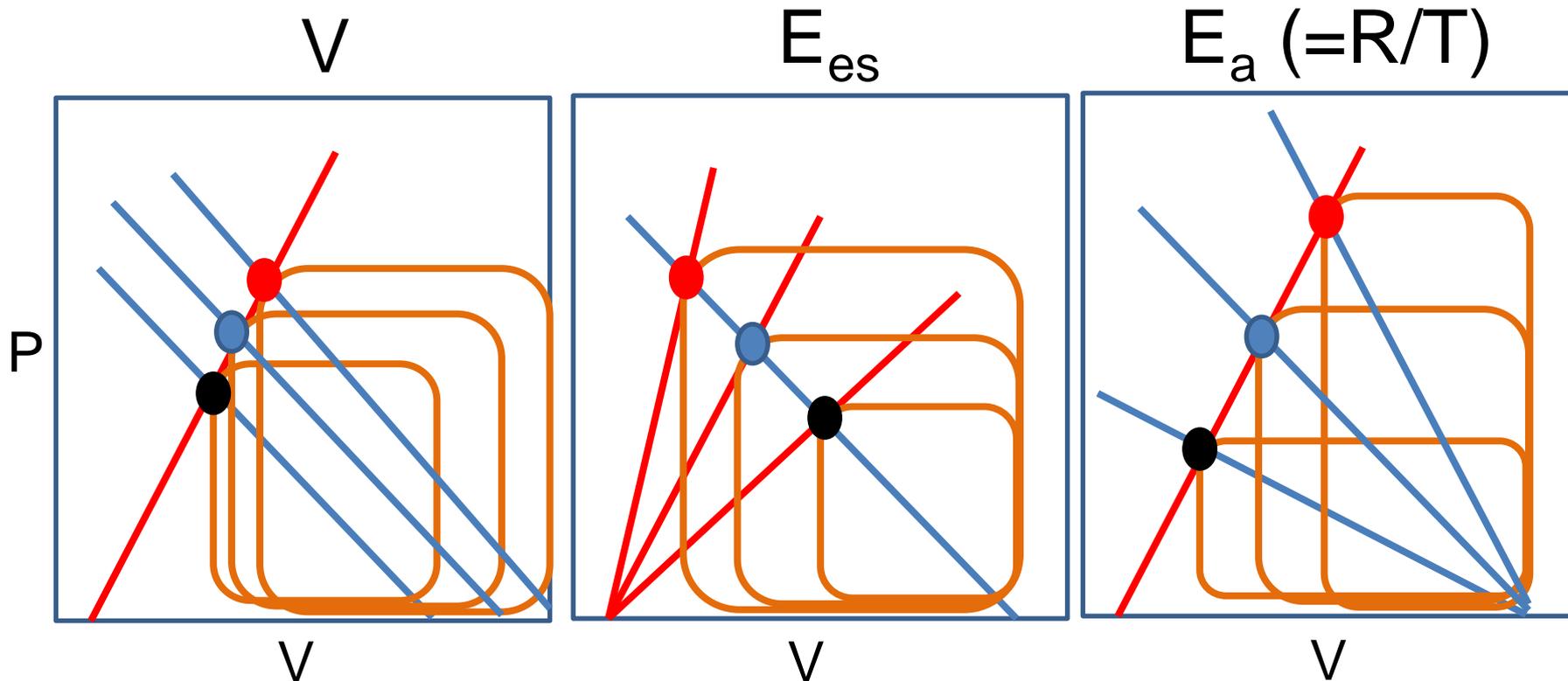
$$E_a = R/T$$



簡単に解ける心室動脈結合

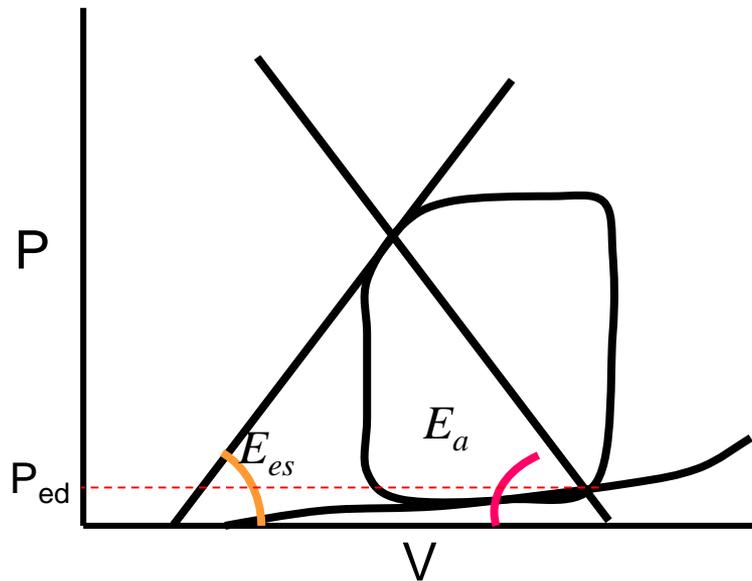
前負荷、収縮性、後負荷、心拍変動

駆出率は前負荷非依存、収縮性、血管抵抗、心拍依存



Frank-Starlingの法則への拡張

拡張特性の導入

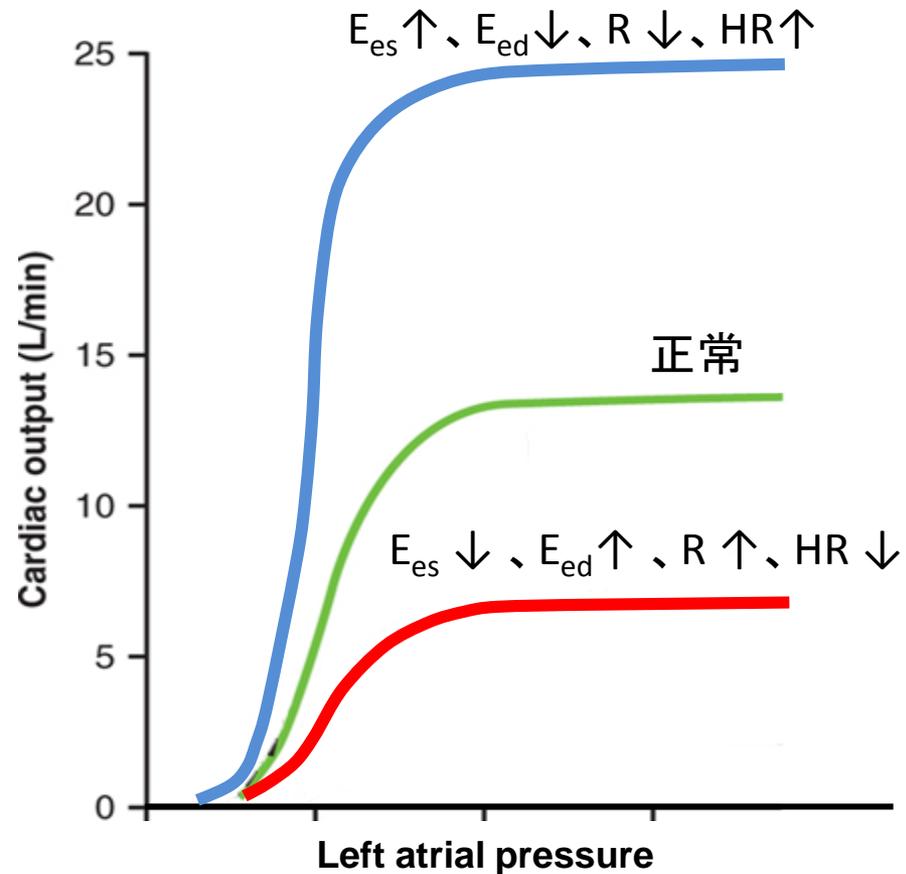


$$P_{ed} \approx e^{E_{ed}V_{ed}}$$

$$V_{ed} = (1/E_{ed}) \ln(P_{ed})$$

$$CO = \frac{60}{(60/HR + R/E_{es})E_{ed}} \ln(P_{ed})$$

負荷依存の定量化

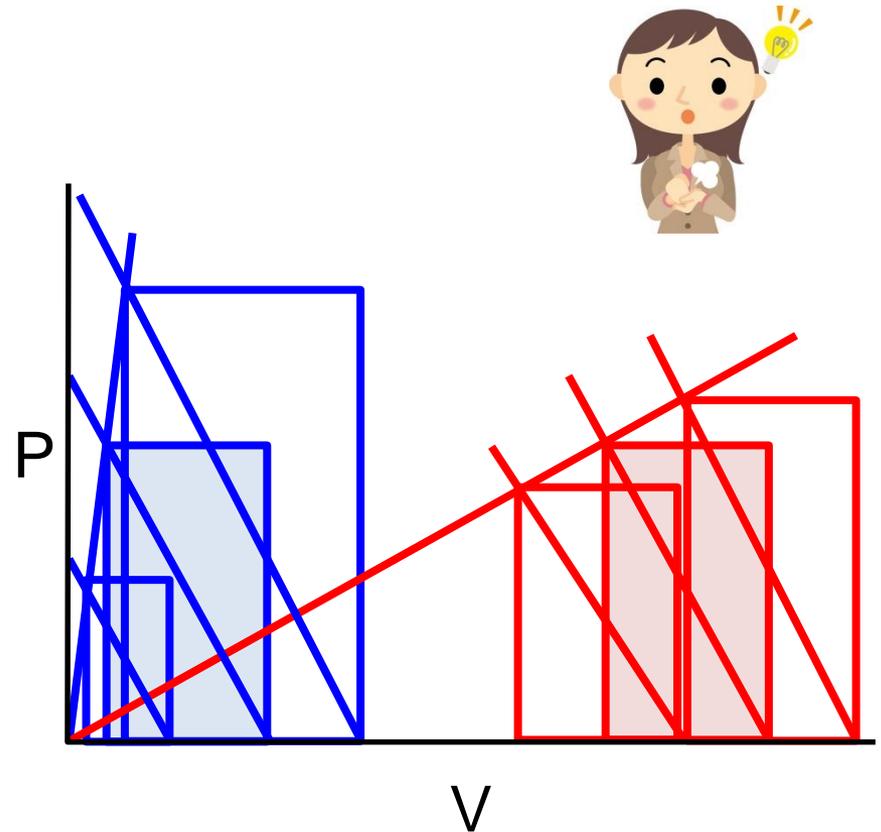
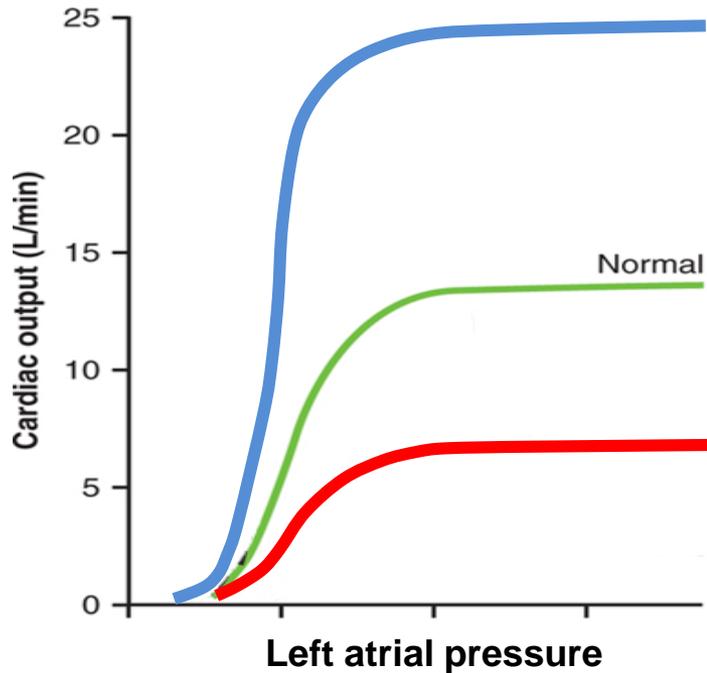


Uemura K et al., Am J Physiol. 2005

「良い心臓は前負荷依存」のワケ

心拍出量曲線は収縮性依存

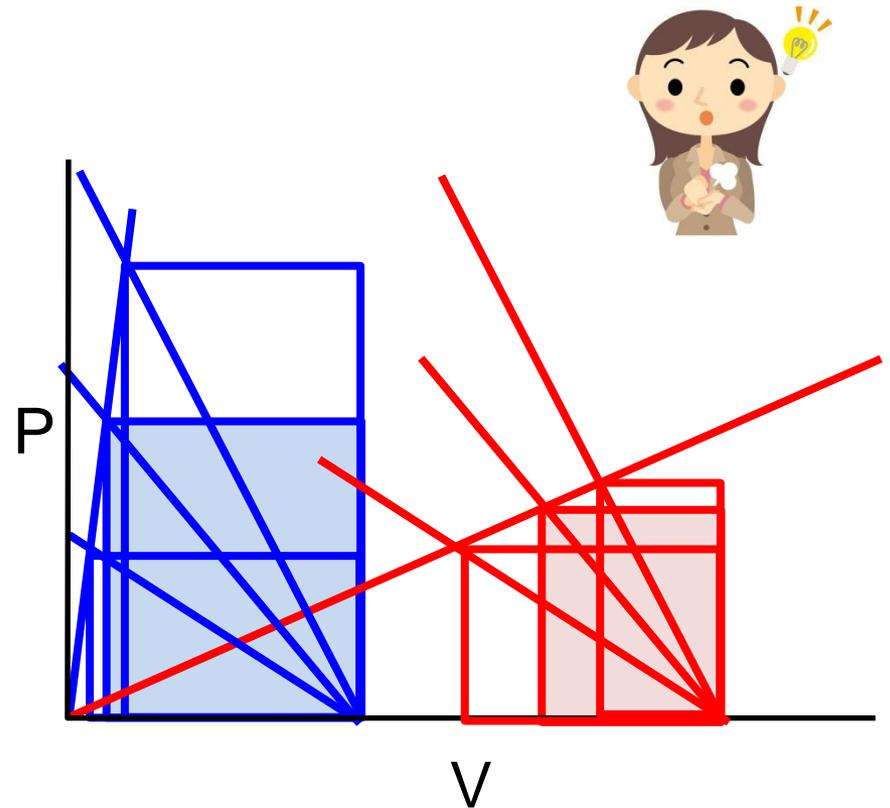
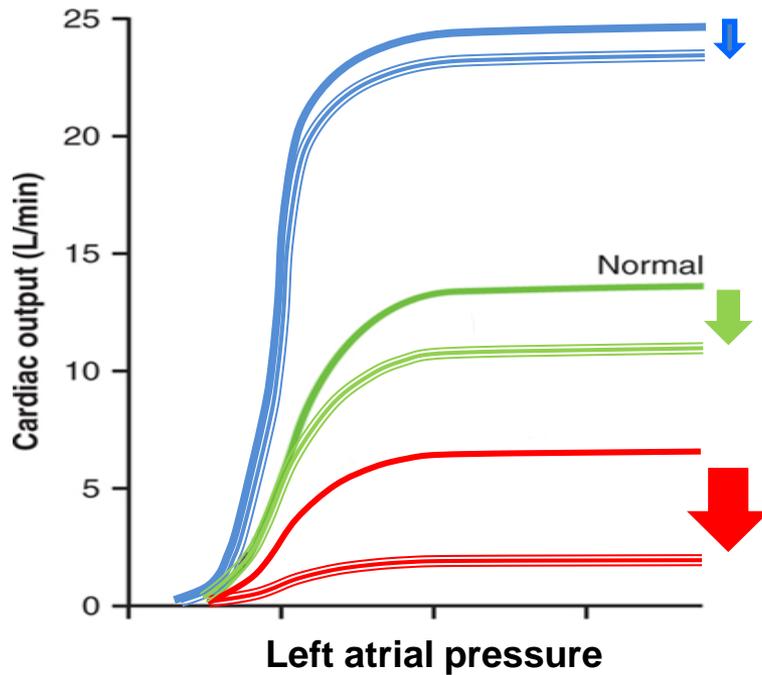
心室動脈結合で解ける



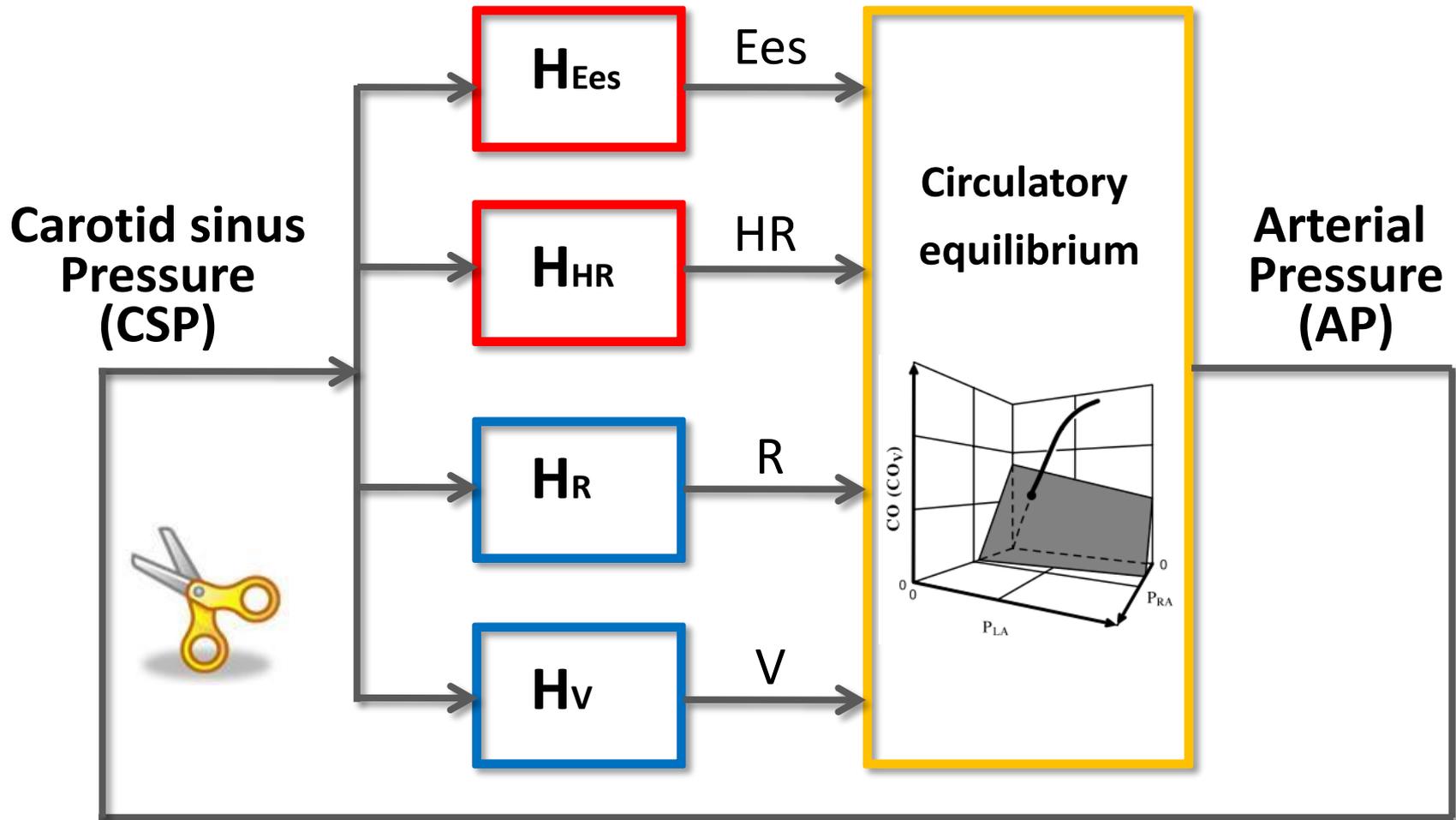
「悪い心臓は後負荷依存」のワケ

心拍出量曲線は収縮性依存

心室動脈結合で解ける

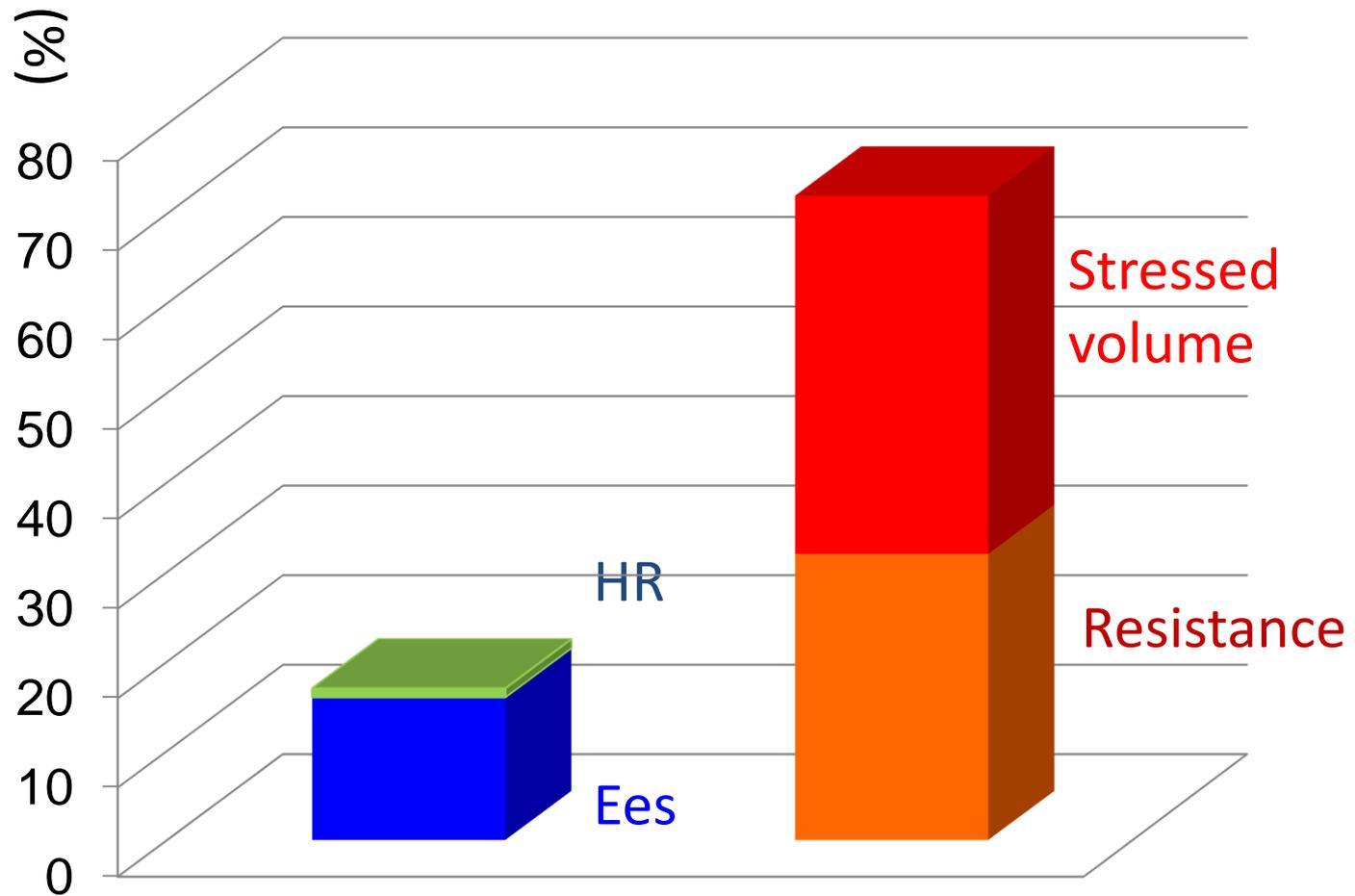


圧反射による血行動態制御



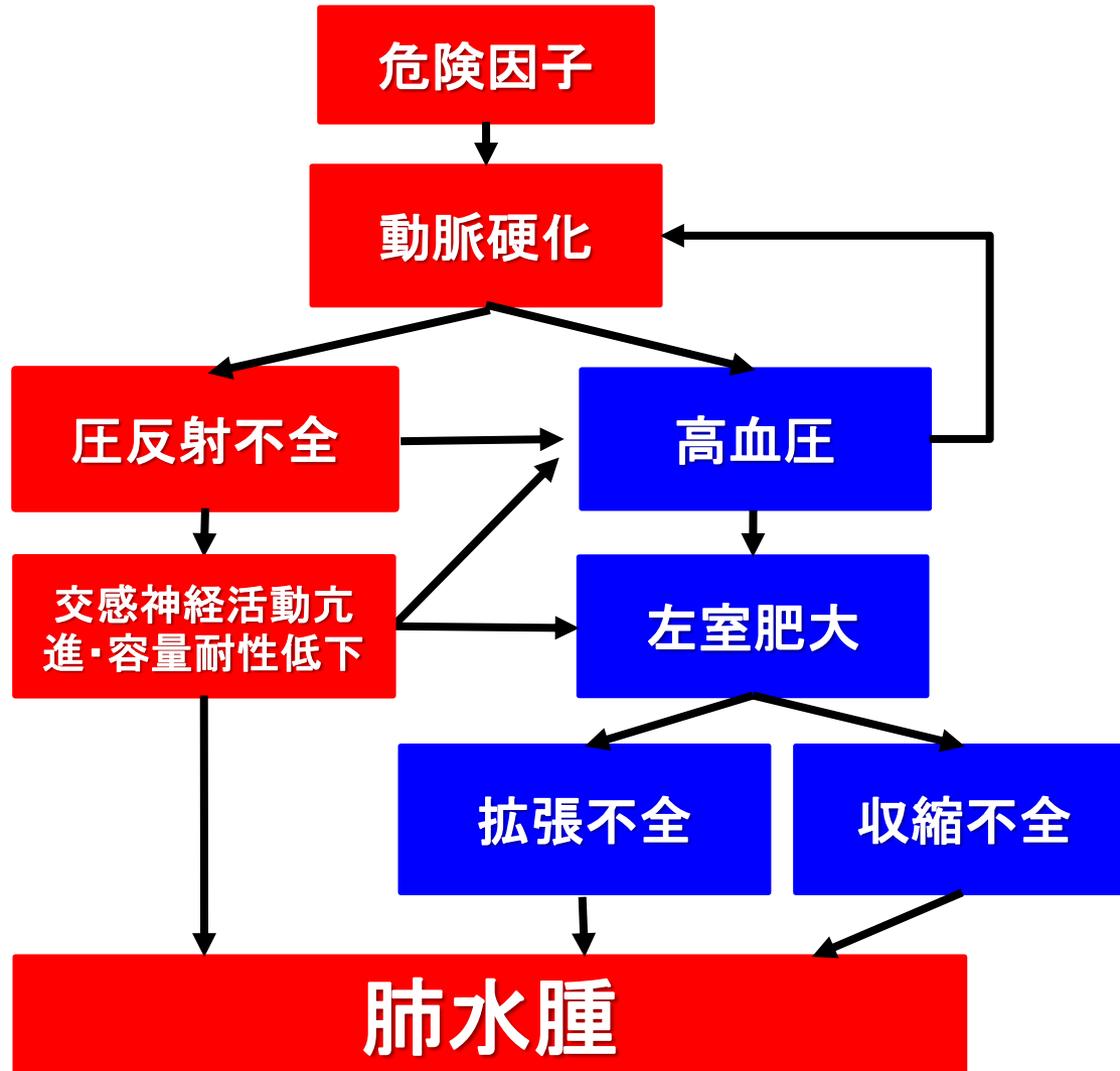
Sakamoto T et al, Am J Physiol 2014

圧反射による血圧制御は血管優位



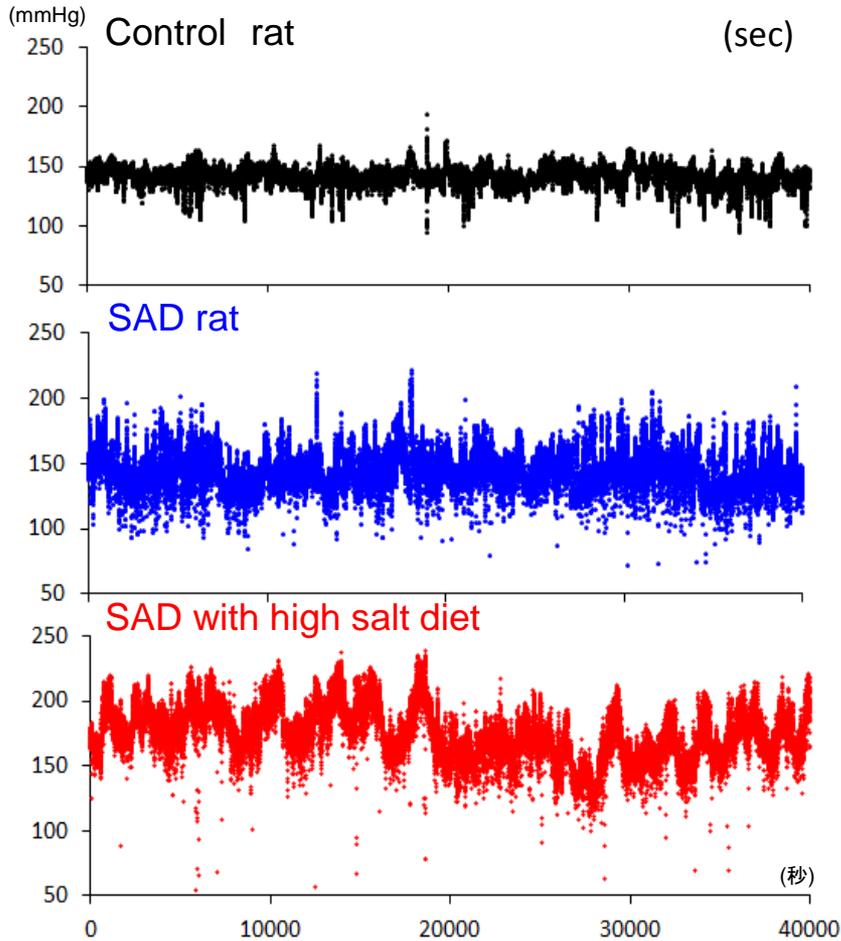
Sakamoto T et al, Am J Physiol 2014

圧反射は心不全防衛の最前線

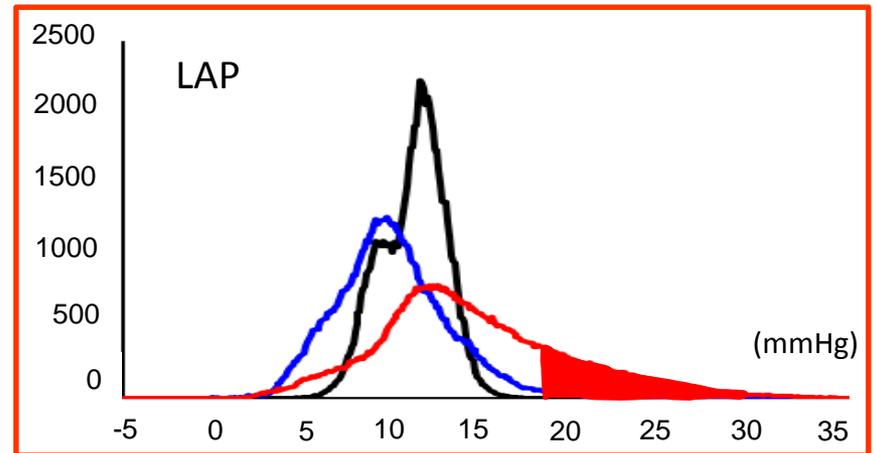
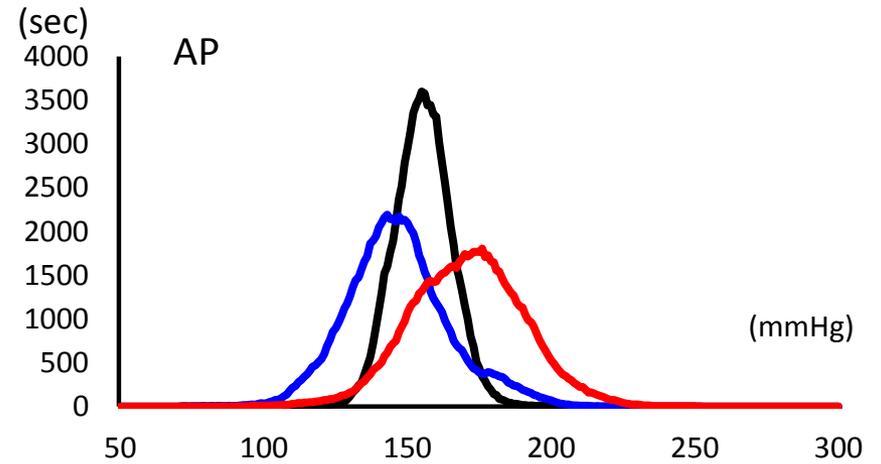


圧反射不全で左房圧著増

血圧長時間記録

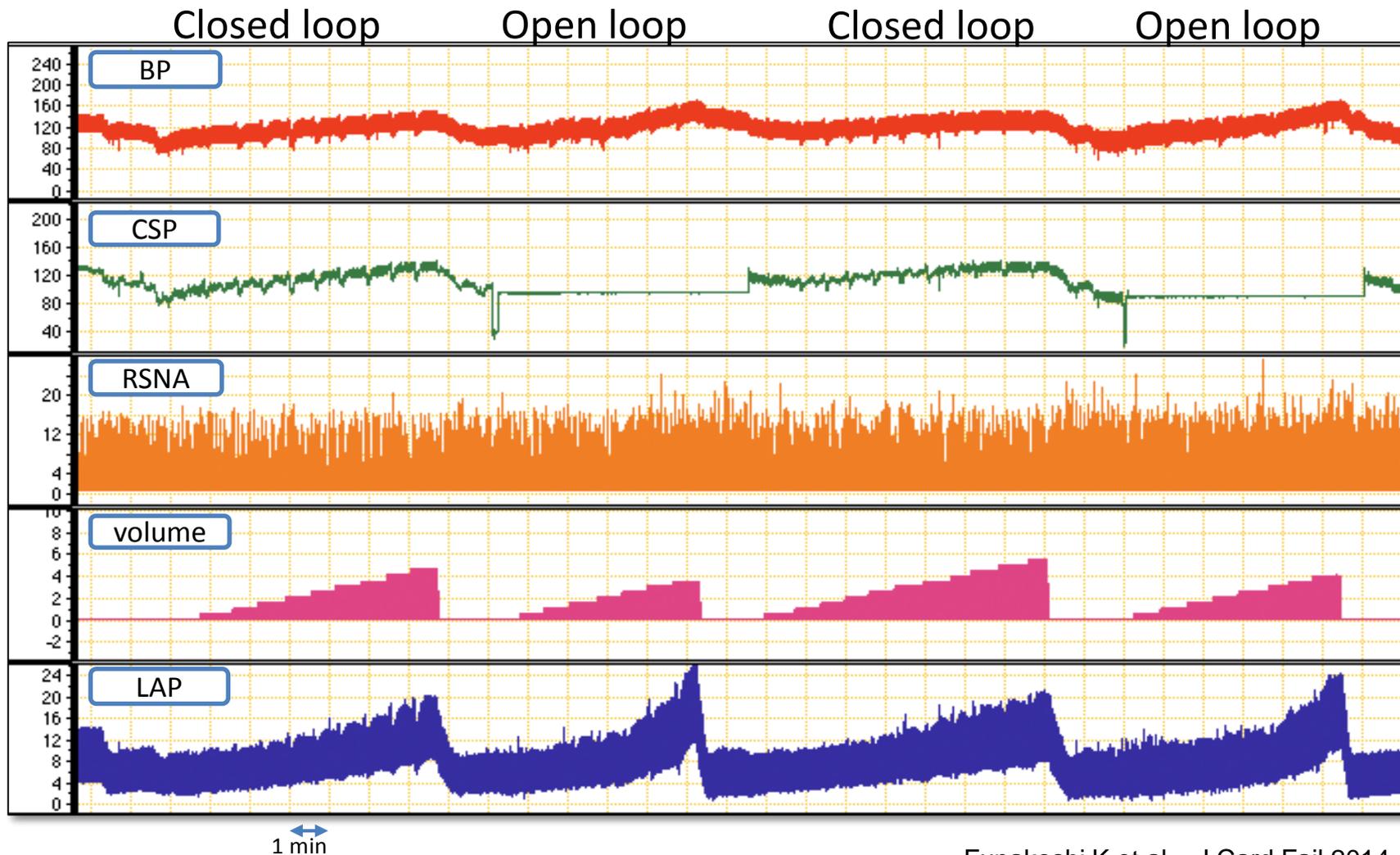


血圧と左房圧のヒストグラム



Sakamoto K, AJP 2015

容量負荷に対する左房圧、血圧の応答

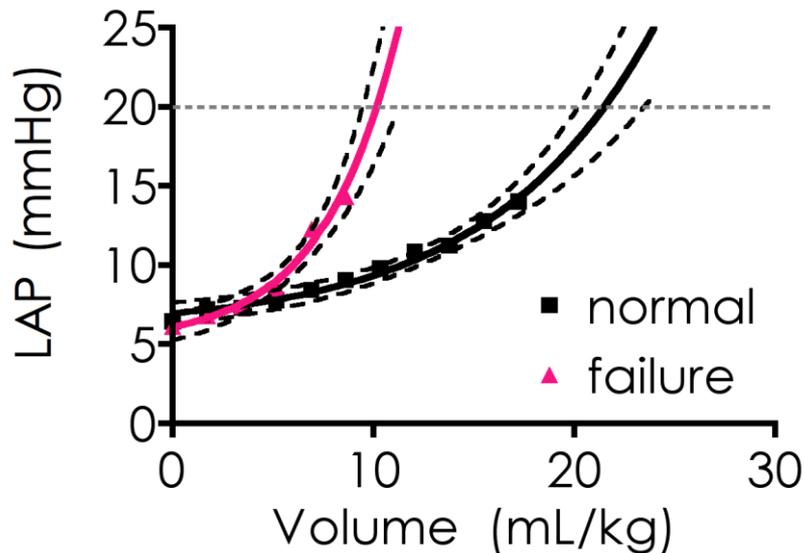


Funakoshi K et al. J Card Fail 2014

圧反射不全は容量耐性を劇的に低下

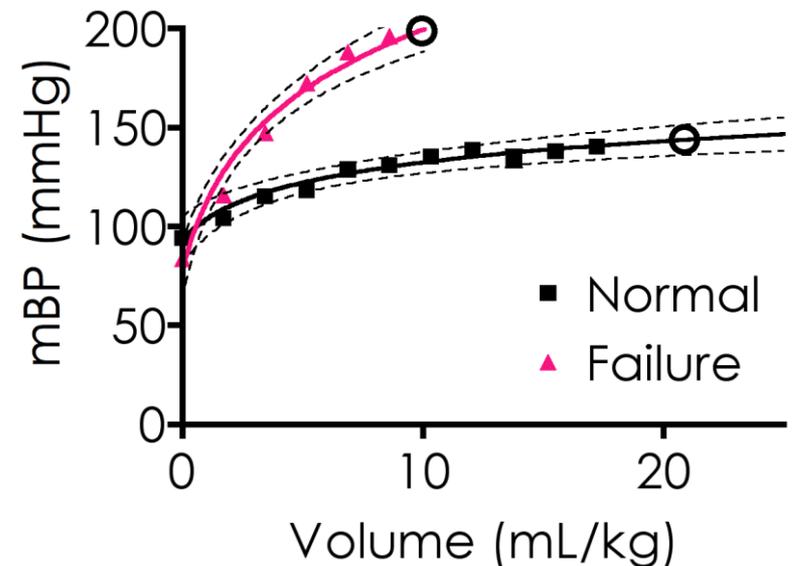
容量負荷と左房圧

rat ID100526



容量負荷と動脈圧

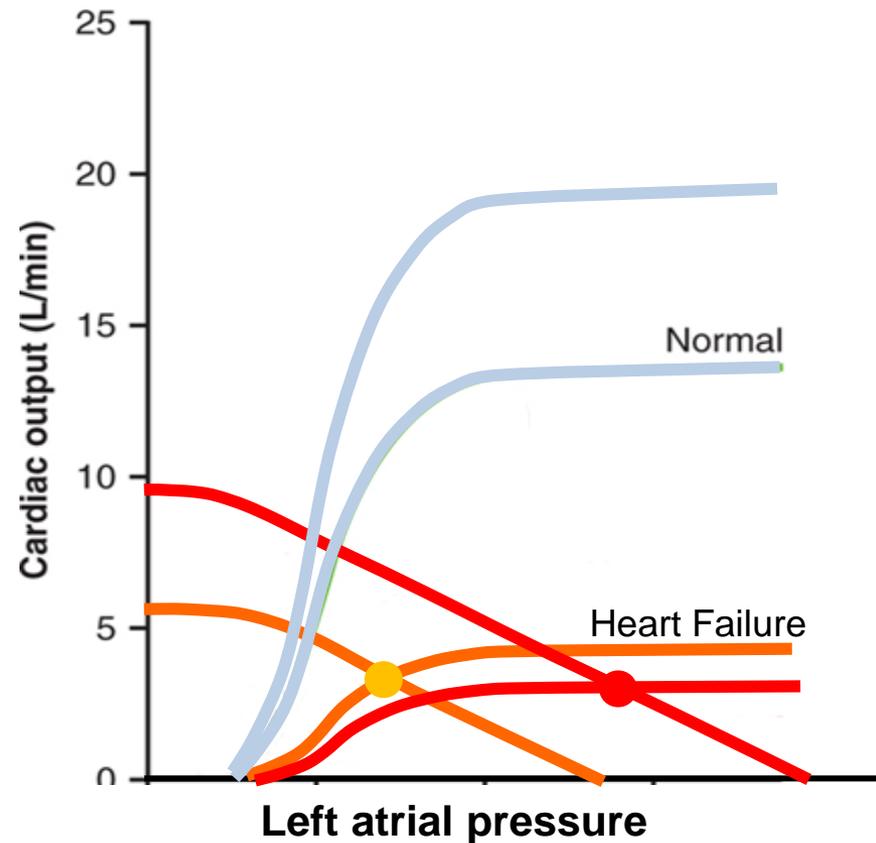
100526-mBP



Funakoshi K et al. J Card Fail 2014

交感神経過緊張は自己破滅

応答する血管、応答できない心臓



嘘っぽいけど本当の話

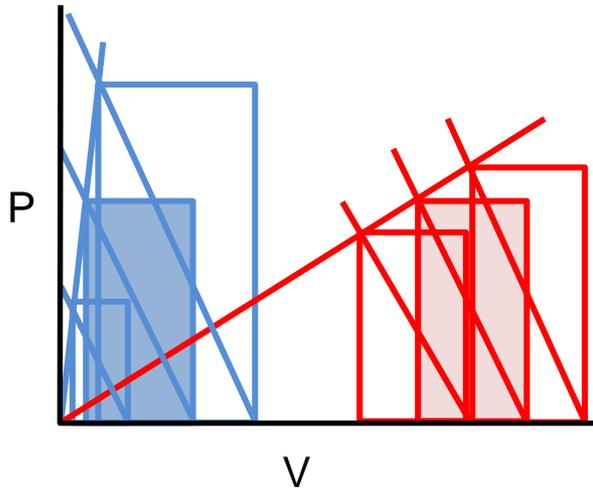


原理から考える循環器

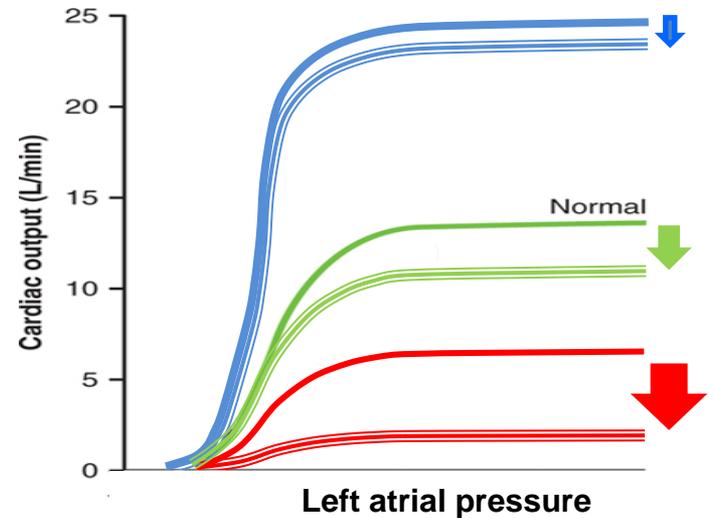
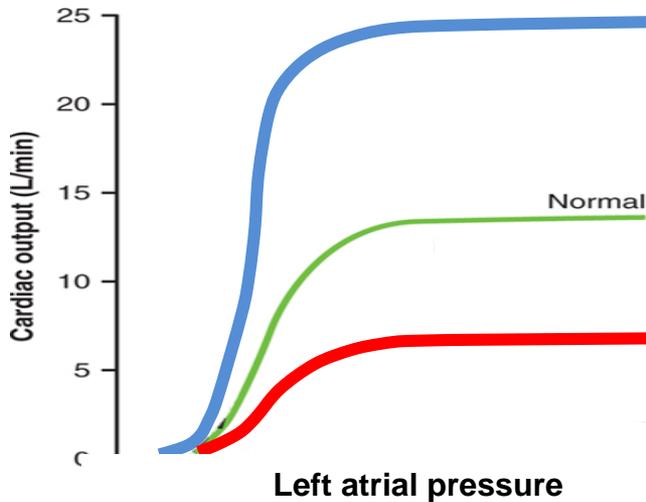
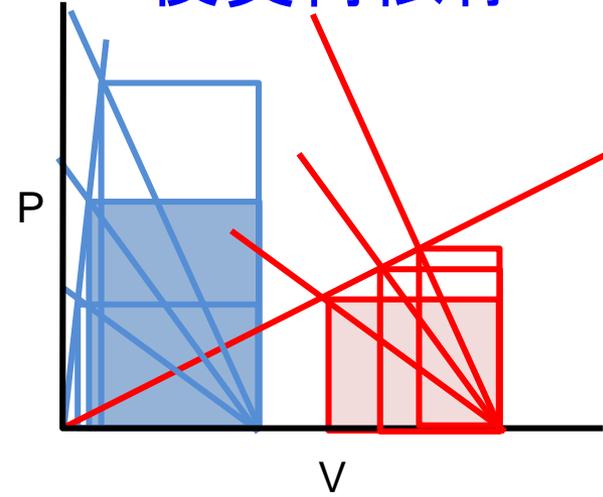
1. 心拍出量の必要量は食事量で決まる
2. 圧容積関係で理解できる血圧・静脈圧・心拍出量の三角関係
3. 心拍出量を決めない正常心
4. 良い心臓は前負荷依存、悪い心臓は後負荷依存
5. 自律神経応答の功罪

知って得するメッセージ 良い心臓と悪い心臓

前負荷依存



後負荷依存

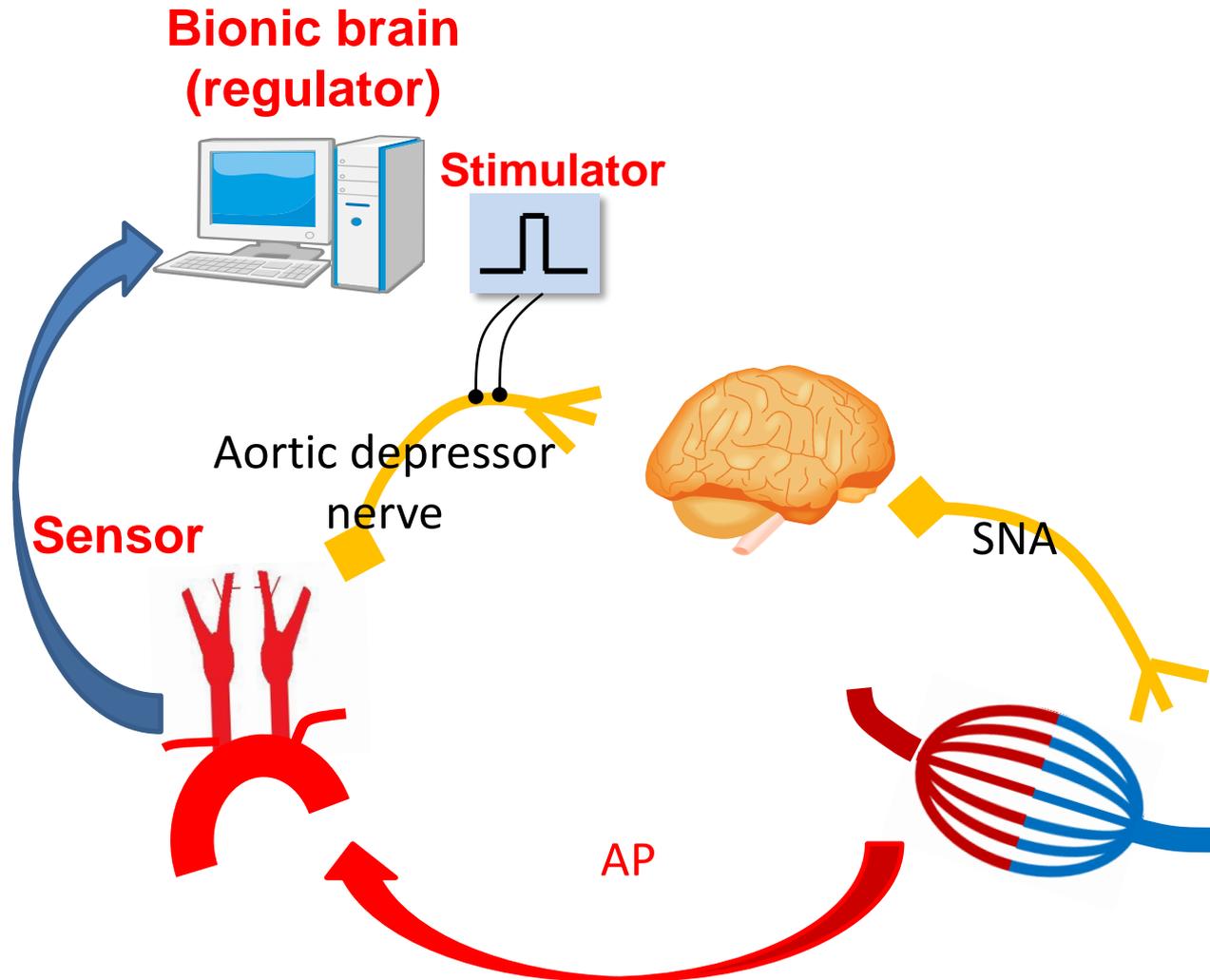


ご清聴ありがとうございました。

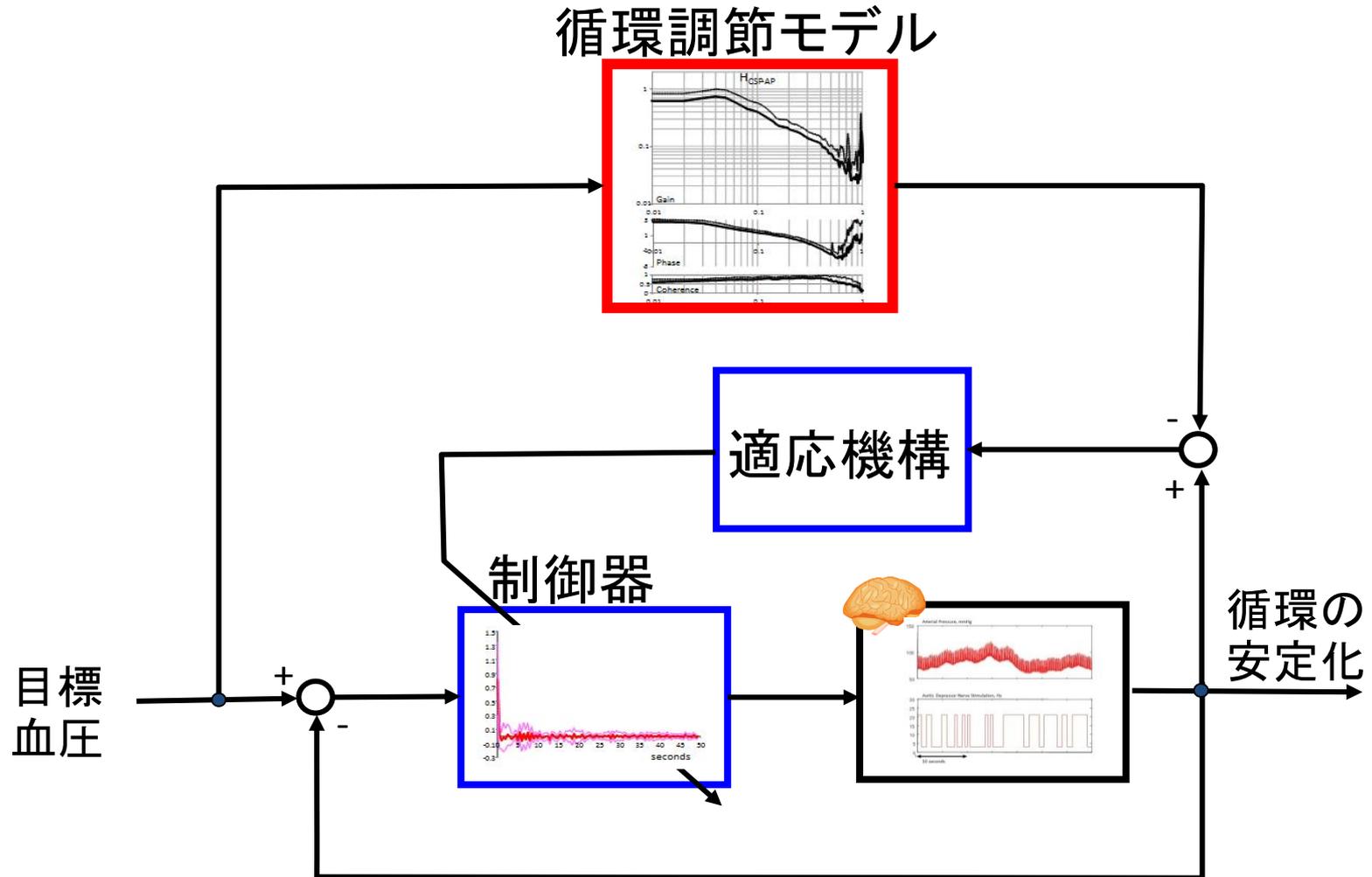
臨床の現場には解決すべき課題が山積しています。原理から考えると課題解決の糸口が見えてくることも少なくありません。本日の雑談はそのような私の経験を語ったものです。原理から考えるという姿勢が、今後の診療に必ず役にたつということを信じて疑いません。



SuperBaroの枠組み



SuperBaroの構成図

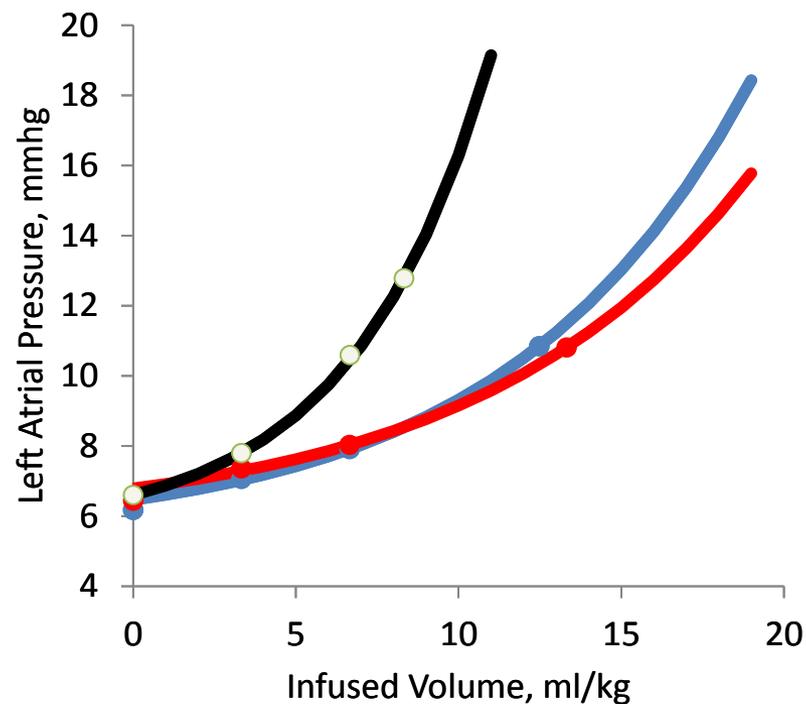
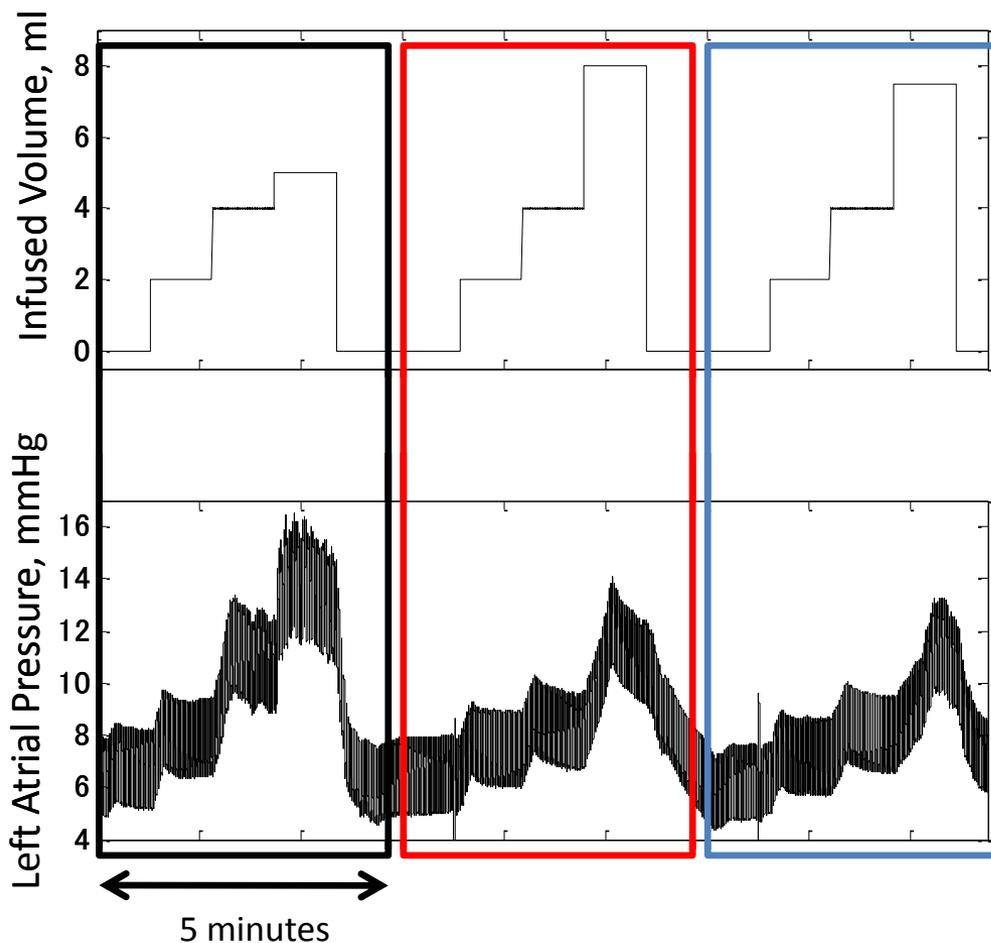


SuperBaroにより容量耐性を再獲得

Baroreflex
Failure

Bionic
Baroreflex

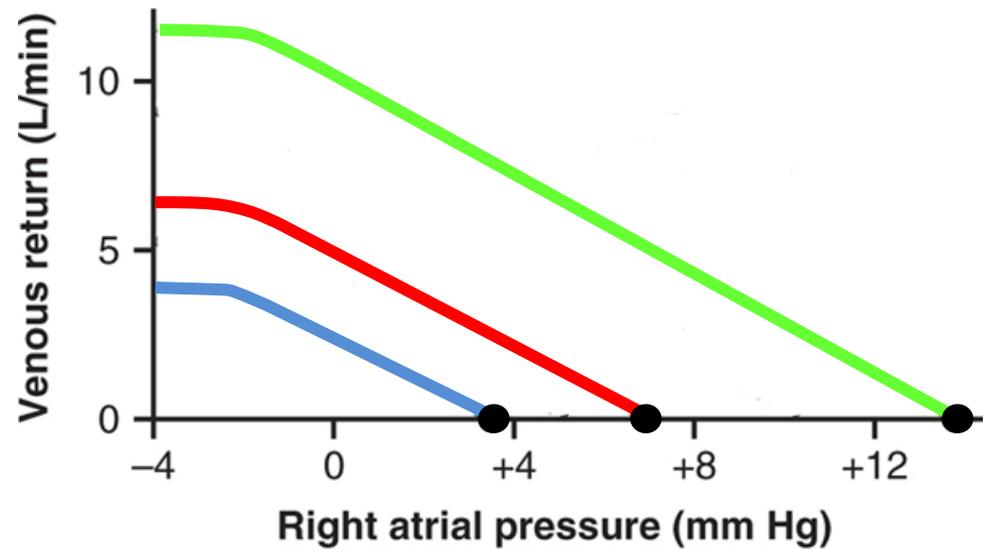
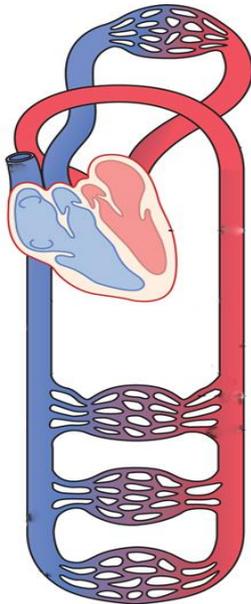
Native
Baroreflex



Hosokawa K. et al., Circulation 2012,
Funakoshi k et al., J Card Fail 2014

生体における静脈環流

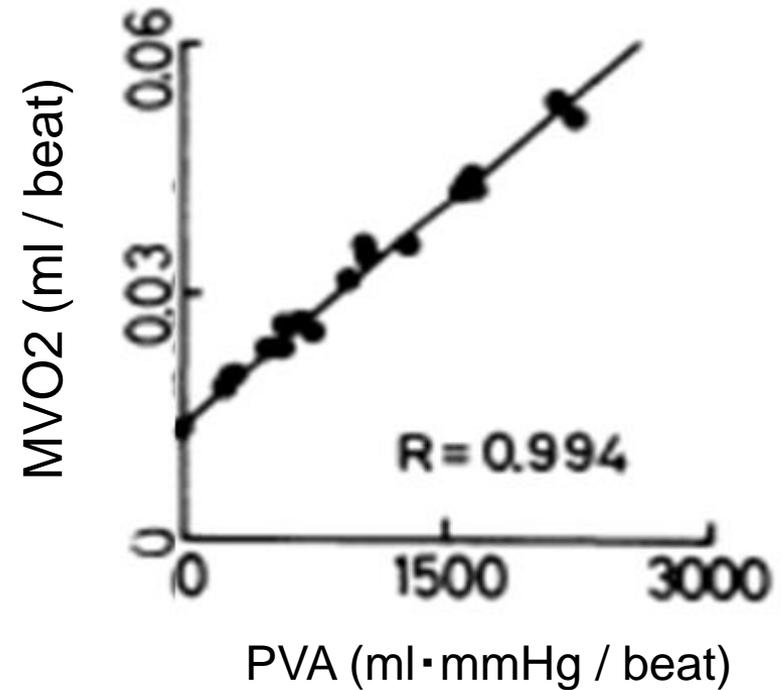
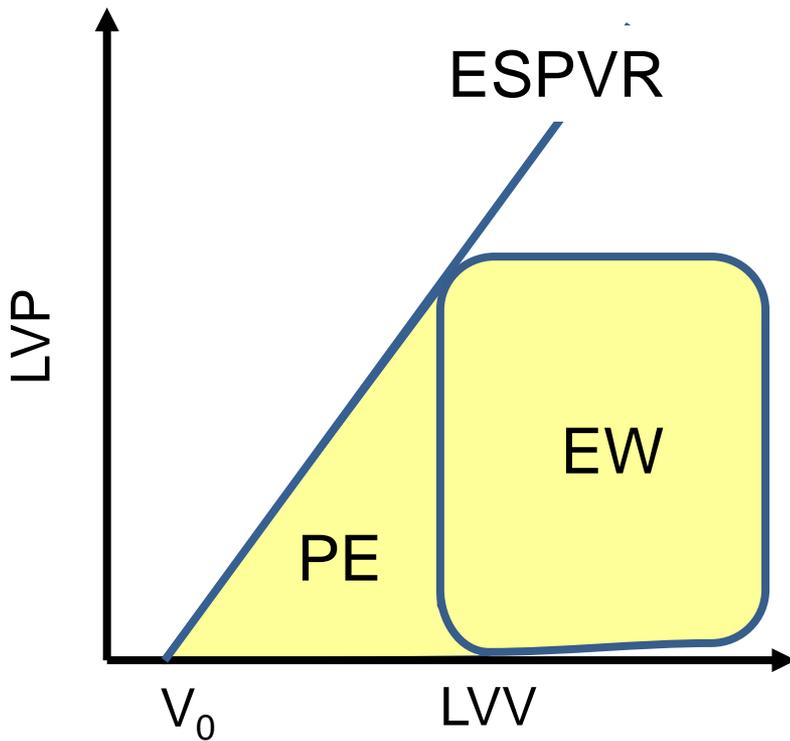
胸腔内陰圧の影響が無視出来ない



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

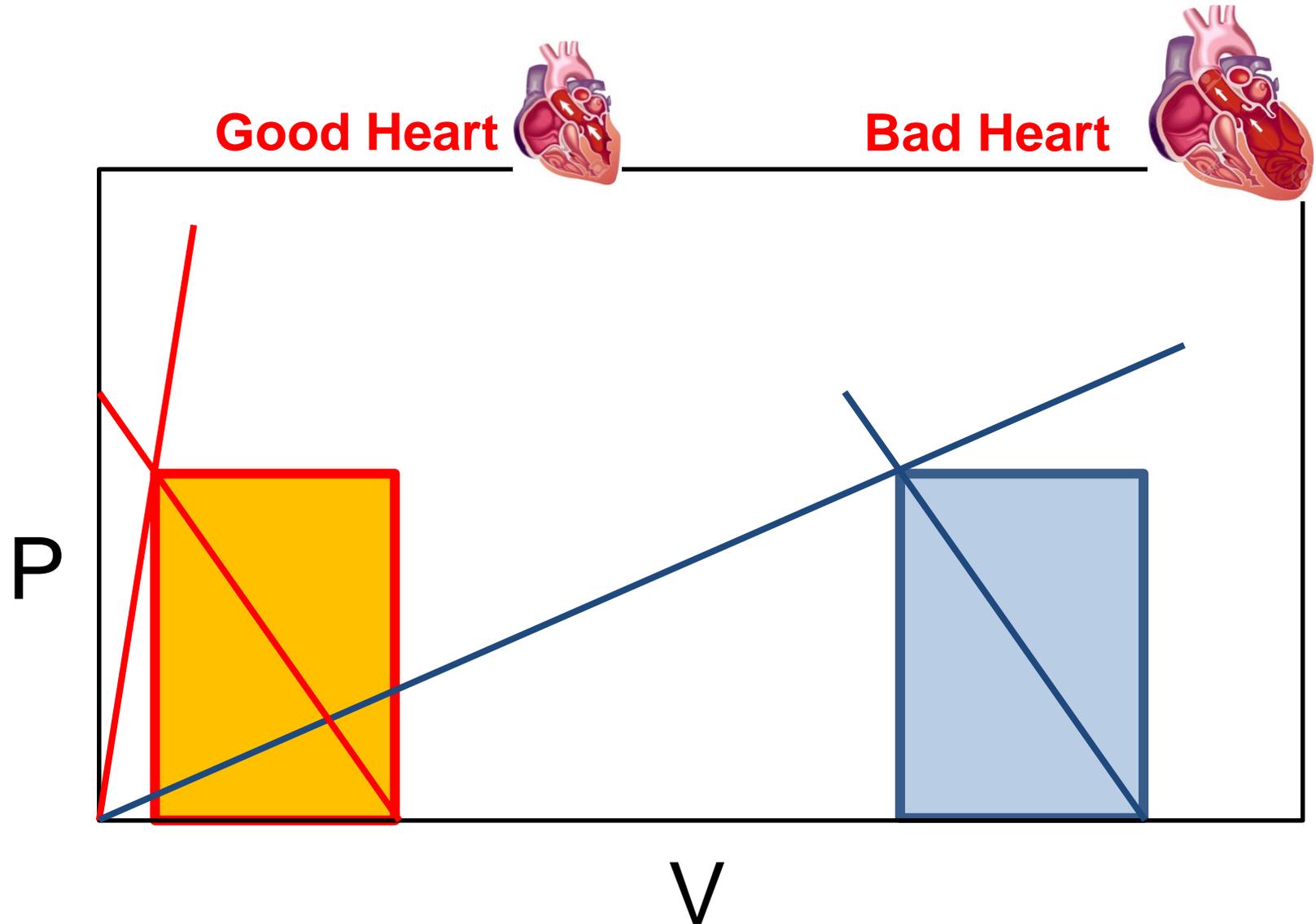
心筋酸素消費量

$$MVO_2 = (aPVA + b) \times HR$$



Suga et al (Am J Physiology, 1979)

良い心臓はエコ



交感神経過緊張の罪

静脈還流が決める心拍出量

