

# 明日から役立つ！ 血行動態の極意 ～その②～

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



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ส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使用される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

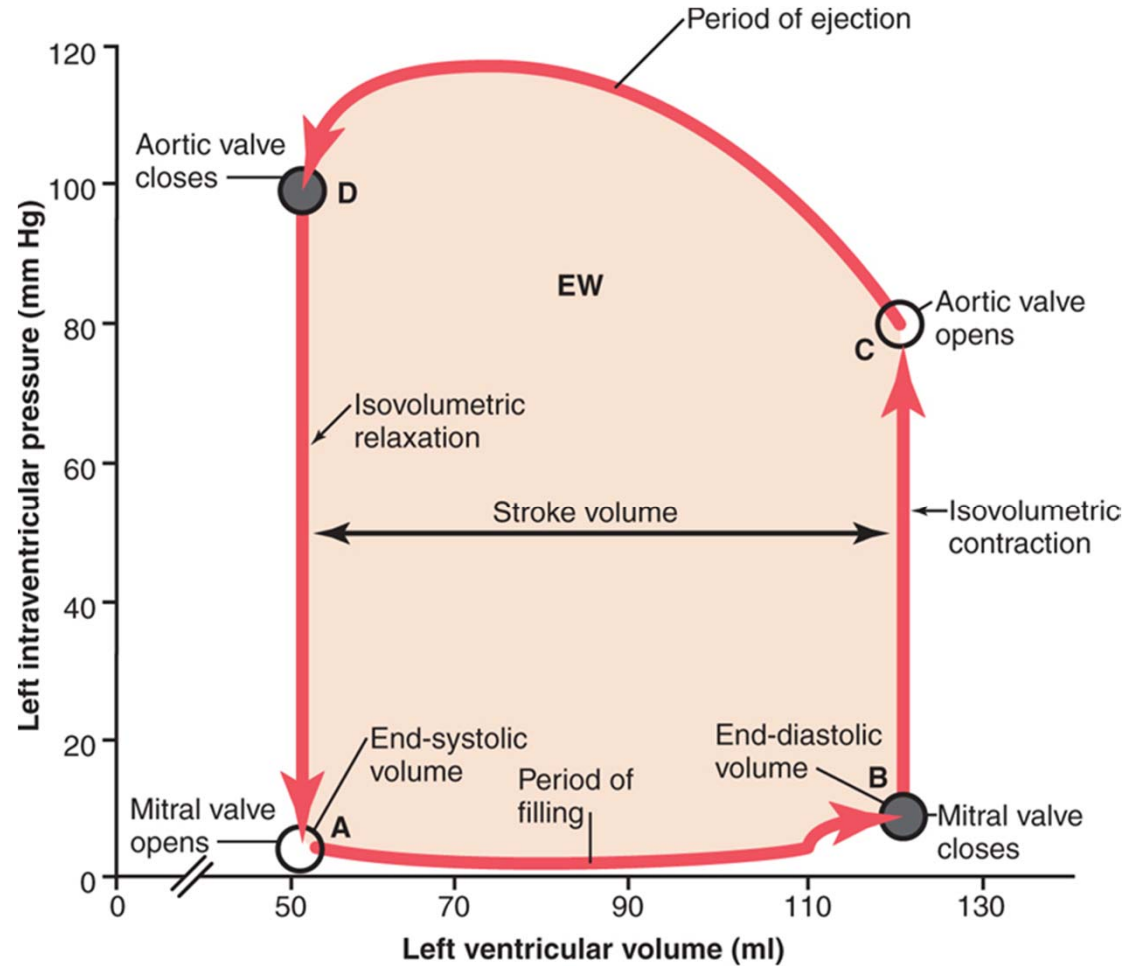
# これが分かれば免許皆伝！

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（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



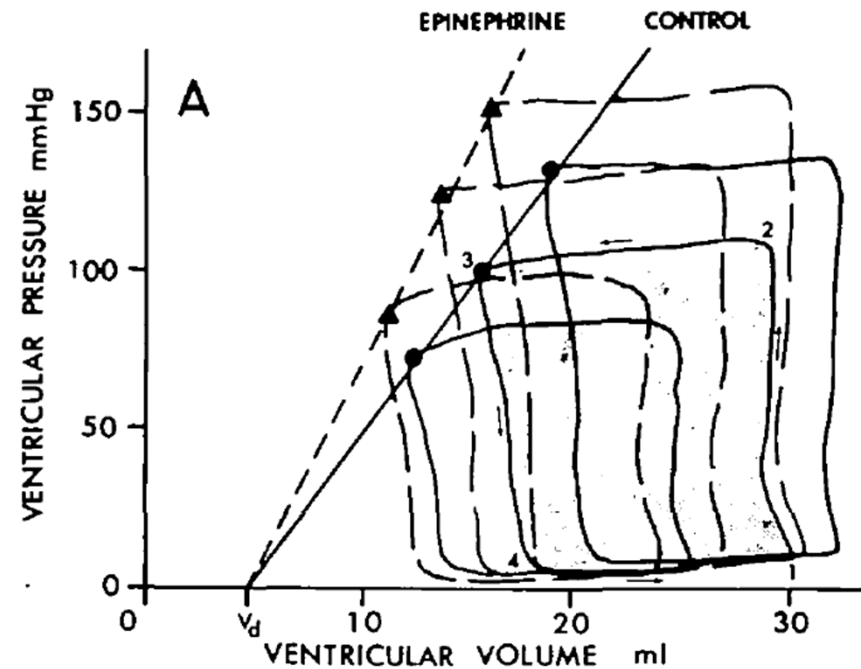
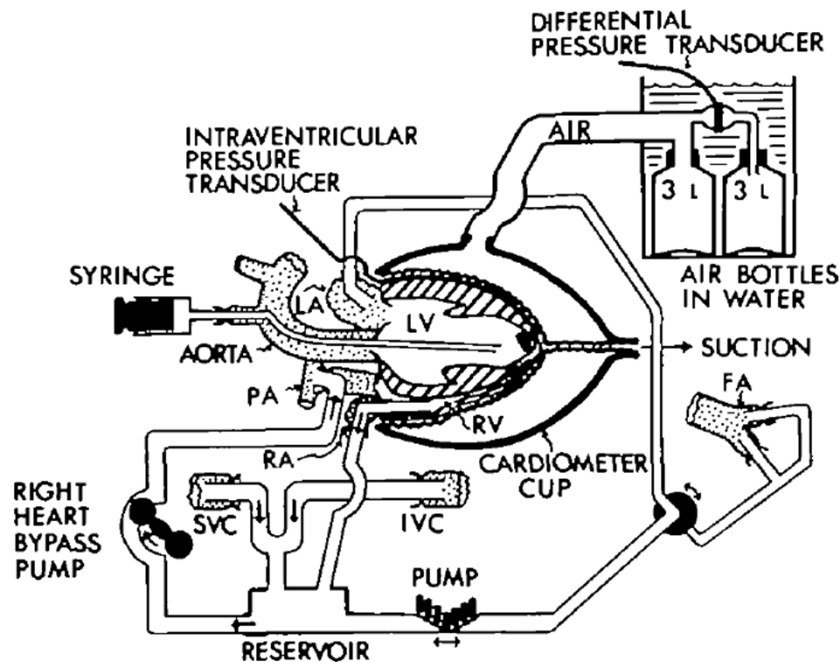
# 圧容積関係とFrank-Starlingの法則

# 圧容積関係



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

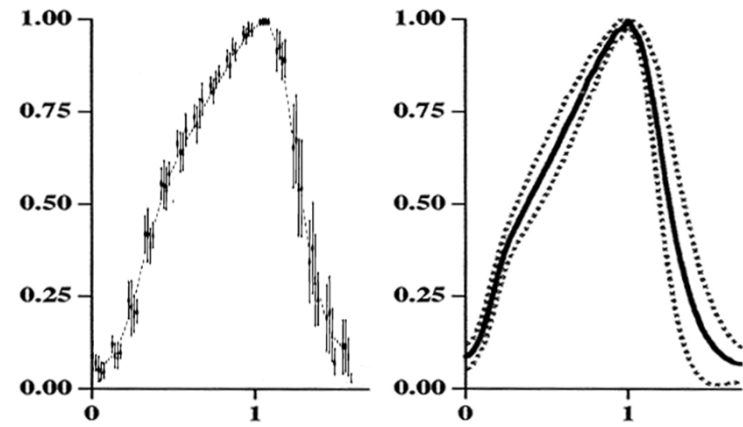
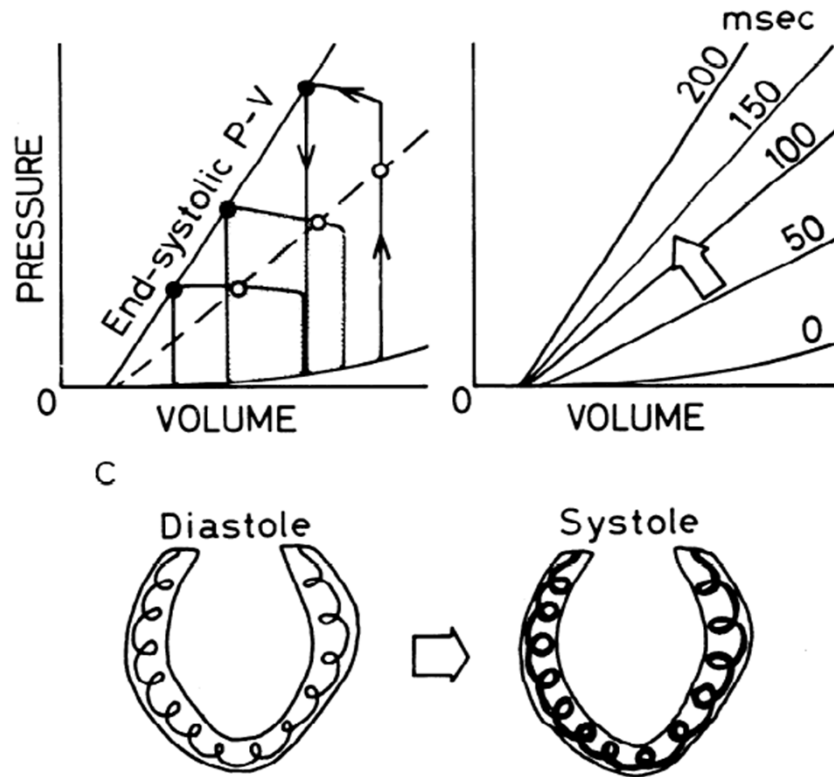
# 収縮末期圧容積関係 (ESPVR) は直線で その傾き (収縮末期エラスタンス: $E_{es}$ ) は 収縮性を反映する



Suga et al, Circ Res 1973

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

# 心室は心周期に応じて硬さが変わる 時変エラスタンス



Suga H et al. Circ Res 1973

Senzaki H et al. Circulation 1996

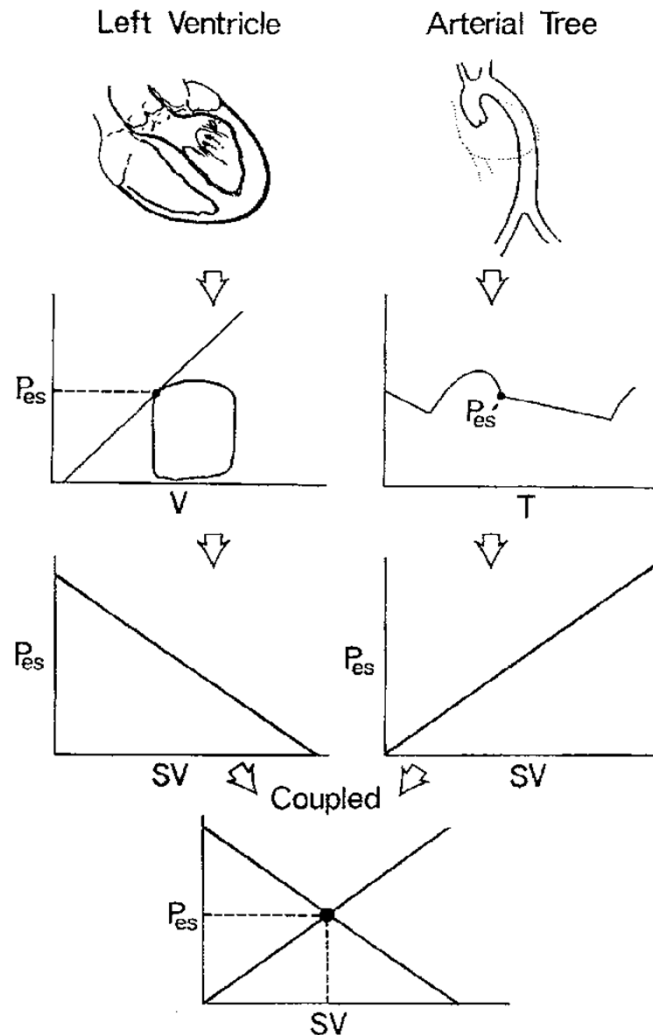
$$P(t) = E(t)(V(t) - V_0)$$

Suga H et al. Am J Physiol 1979



# 圧容積関係とポンプ機能

# 心室動脈結合：動脈の実効エラスタンス ( $E_a$ ) によるポンプ機能の評価



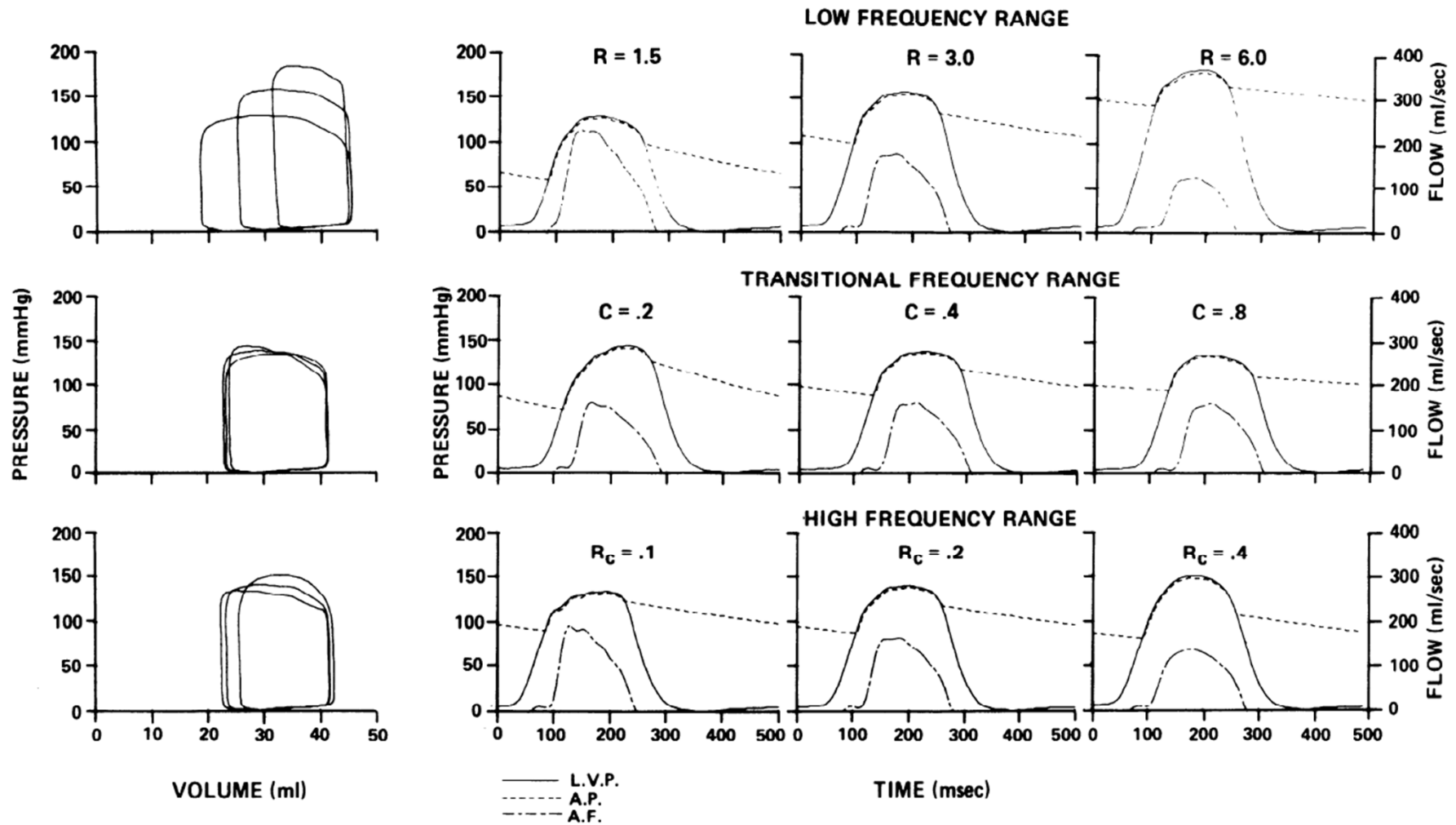
$$\begin{aligned}
 P_{es} &\approx P_m = R \cdot F \\
 &= R \frac{SV}{T} \\
 &= E_a SV
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_{es} &= E_{es} (V_{es} - V_0) \\
 &= E_{es} (V_{ed} - SV - V_0)
 \end{aligned}$$

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

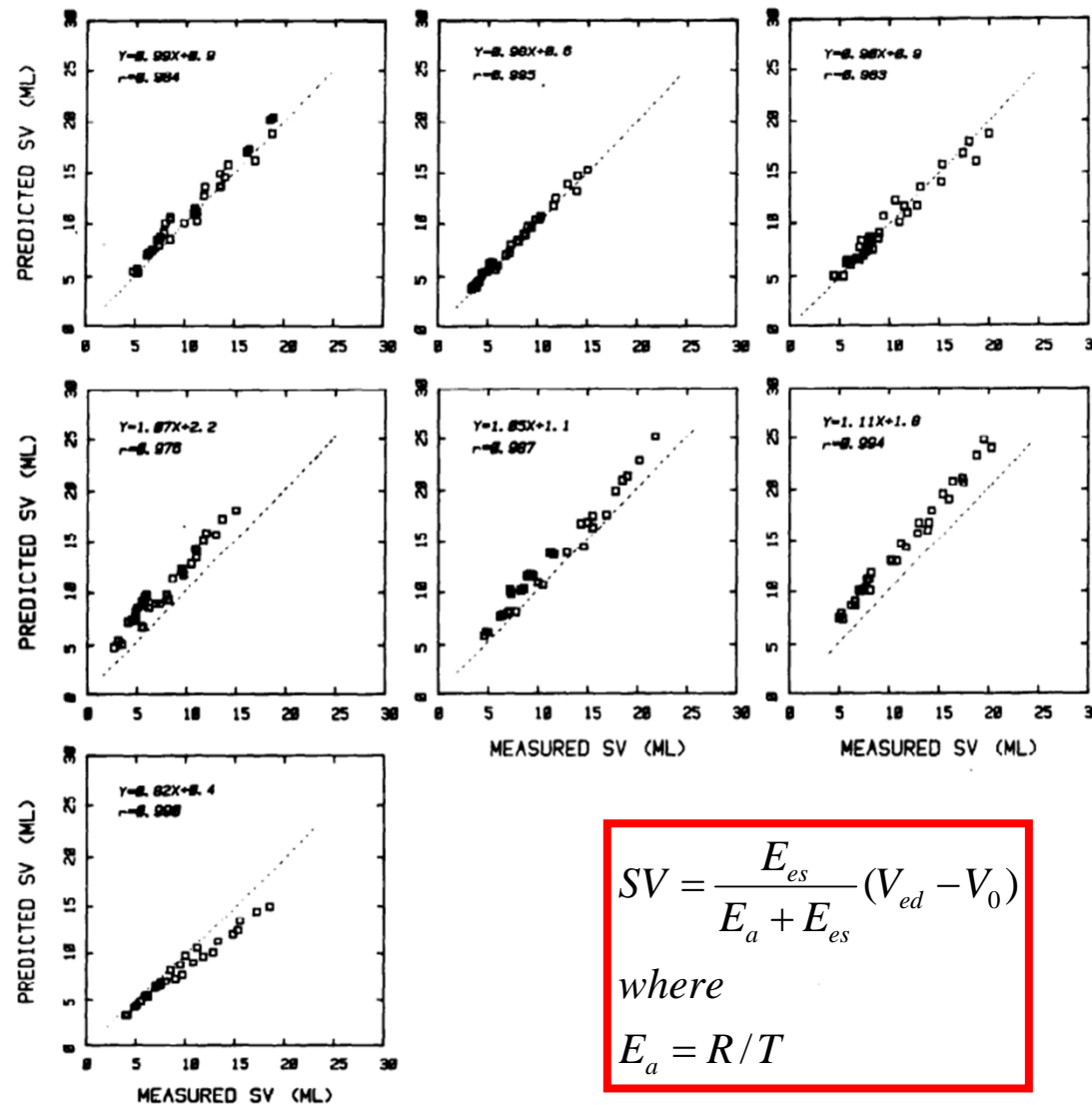
Sunagawa K et al., Am J Physiol 1983

# 動脈インピーダンスと圧容積関係



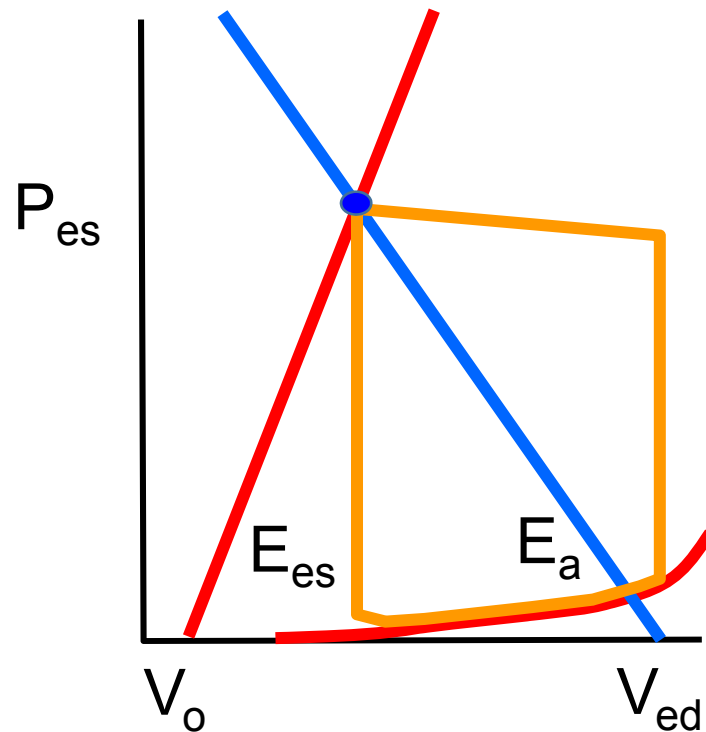
Sunagawa K et al., Am J Physiol 1985

# 心室動脈結合はSVを正確に推定



Sunagawa K et al., Am J Physiol 1983

# Four step心室動脈結合



Step 1: ESPVRの線を引く

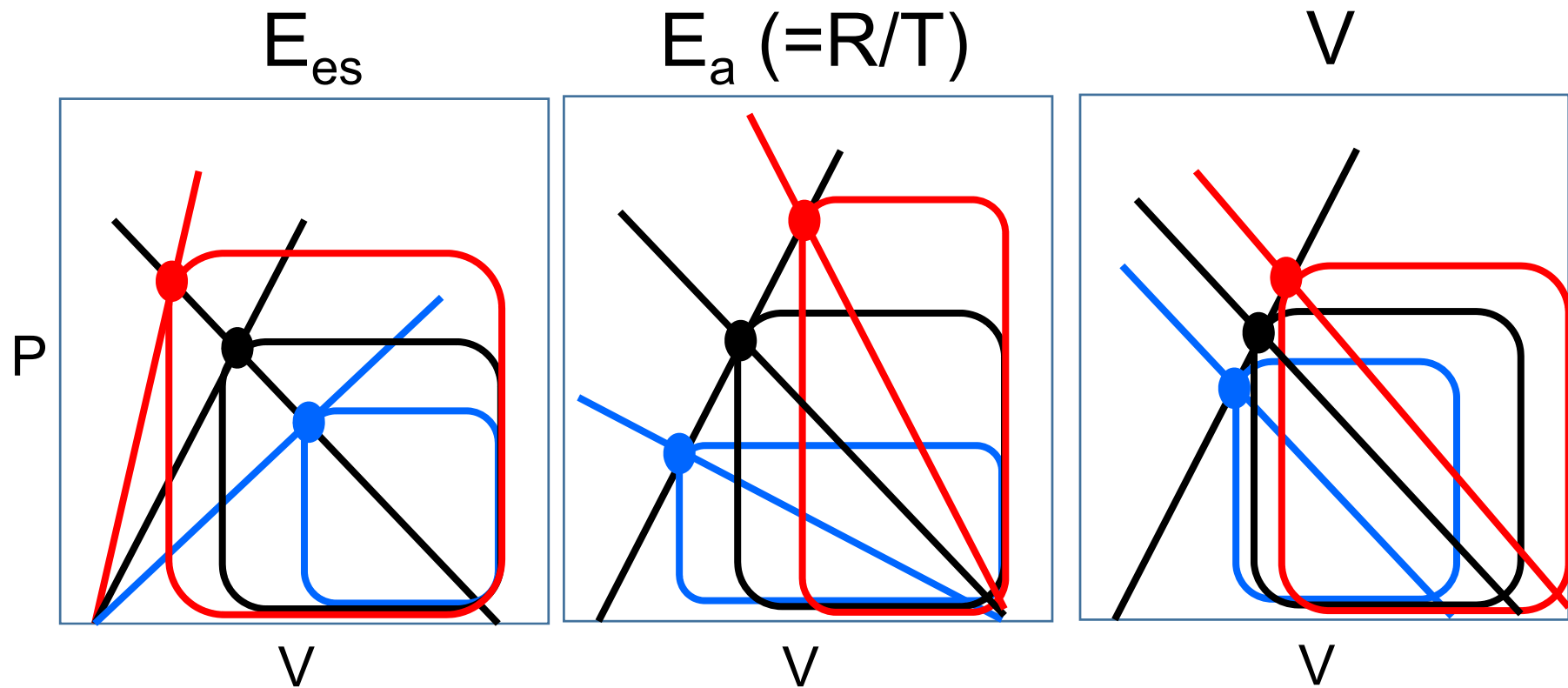
Step 2: EDPVRと拡張末期圧から拡張末期容積 ( $V_{ed}$ ) 推定

Step 3:  $E_a$ を推定し、その線を引く

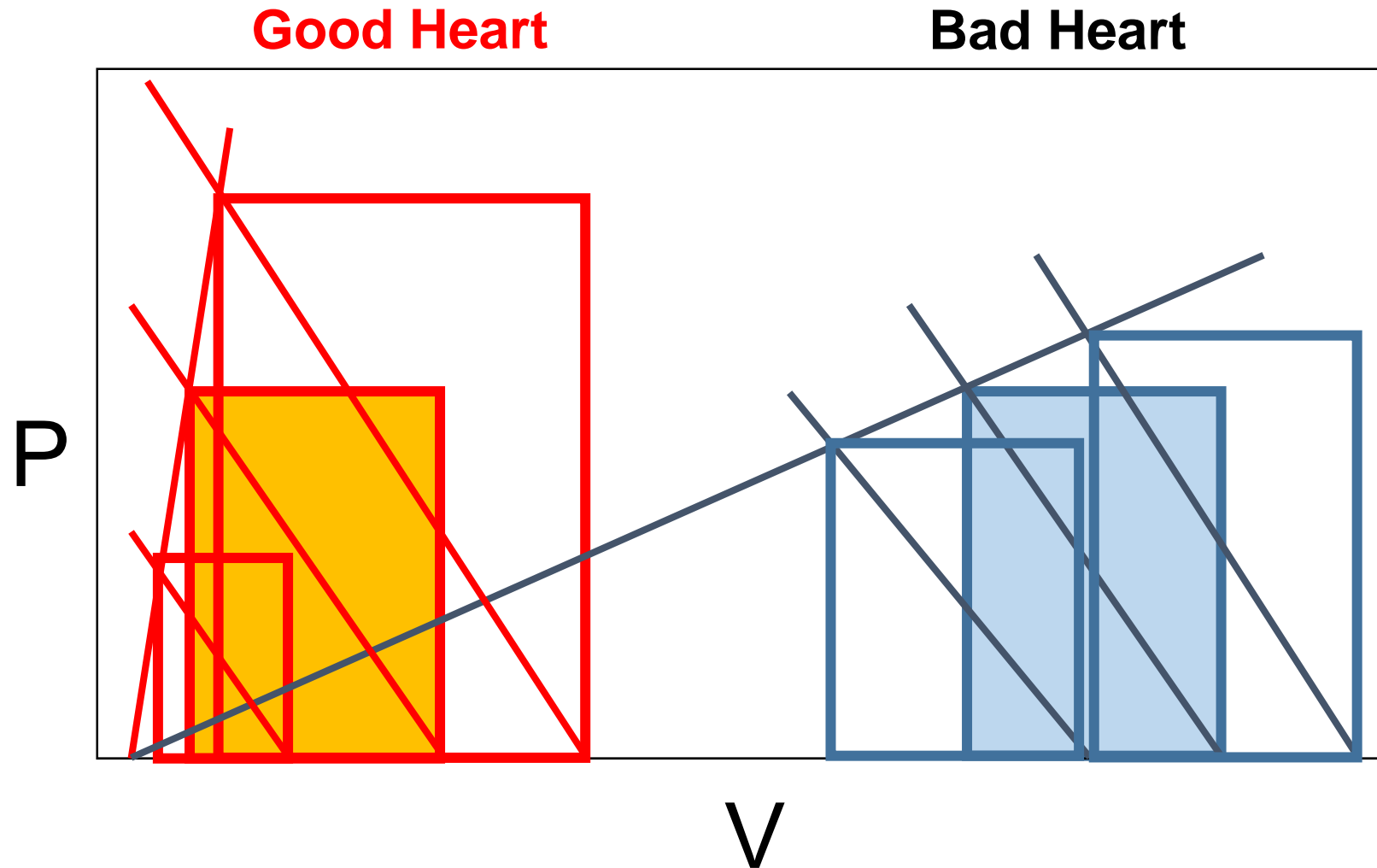
Step 4: ESPVRと $E_a$ の交点を求める

$$\begin{aligned} SV &= \frac{E_{es}}{E_{es} + E_a} (V_{ed} - V_0) \\ &= \frac{E_{es}}{E_{es} + \frac{R}{T}} (V_{ed} - V_0) \end{aligned}$$

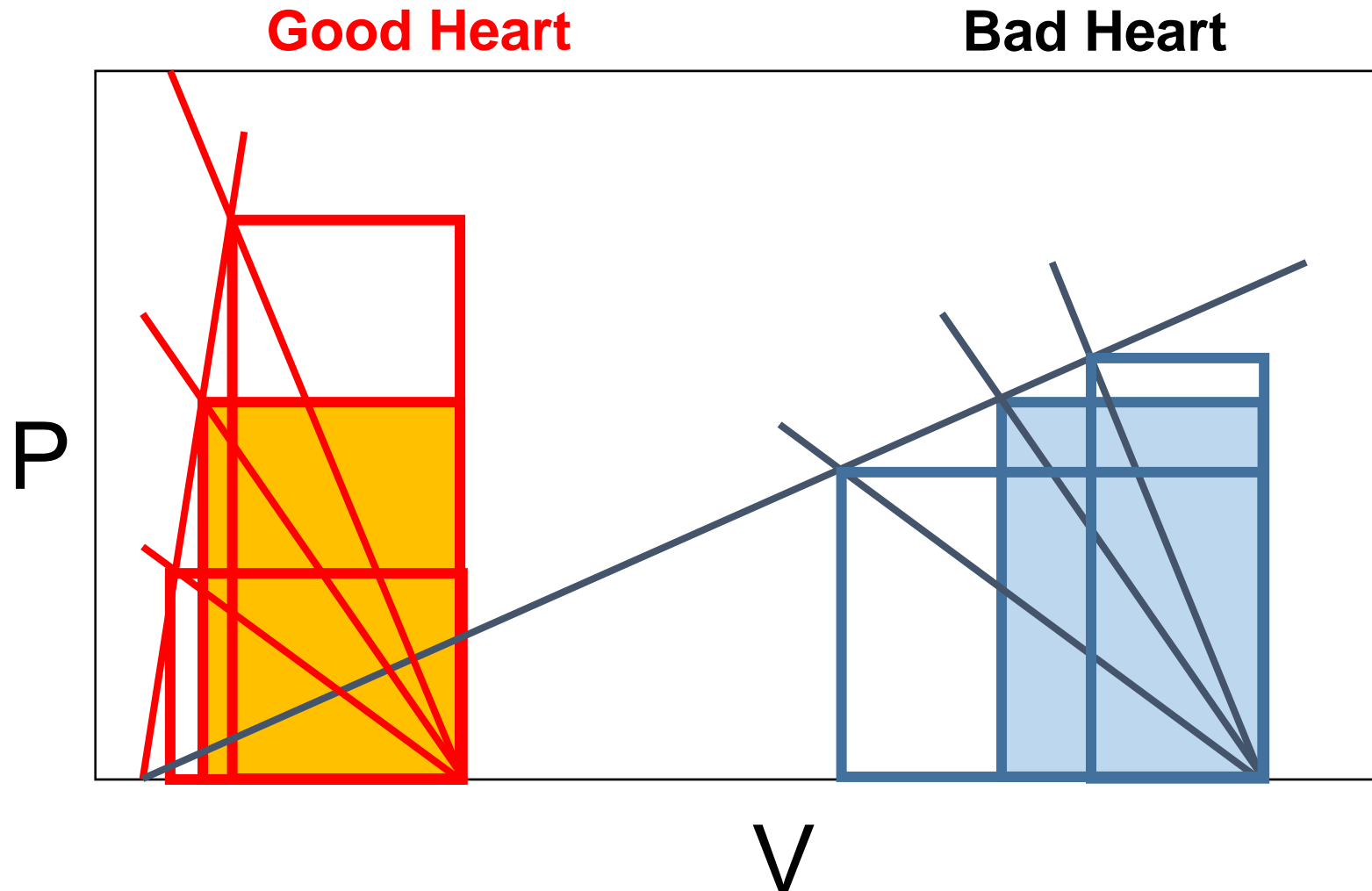
# SV推定のまとめ



# 良い心臓は前負荷依存



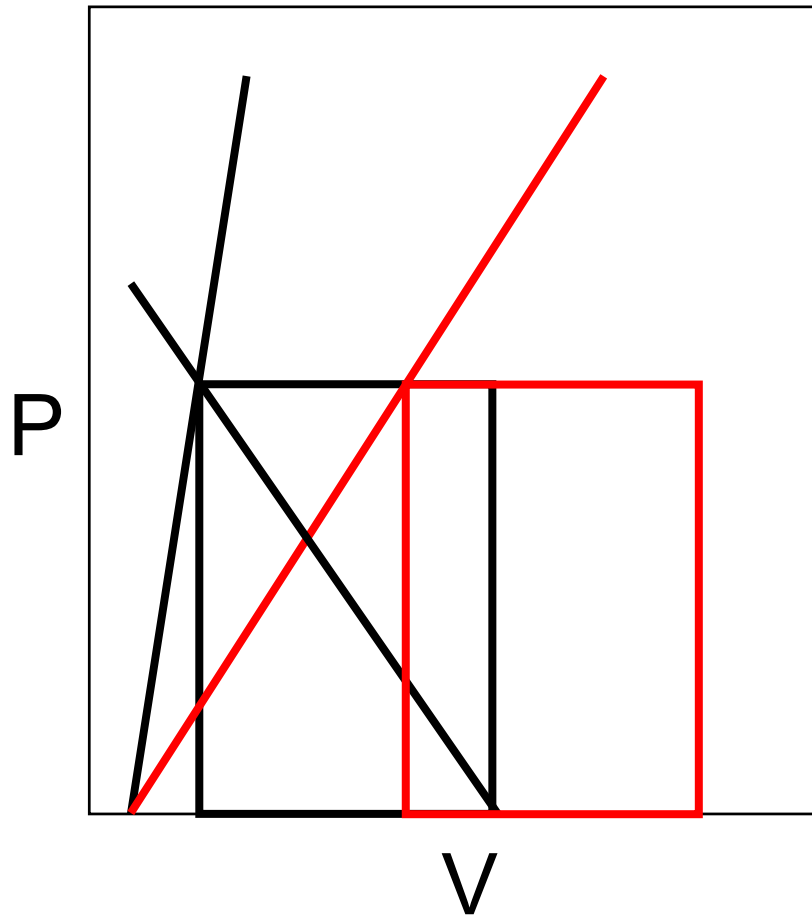
# 悪い心臓は後負荷依存



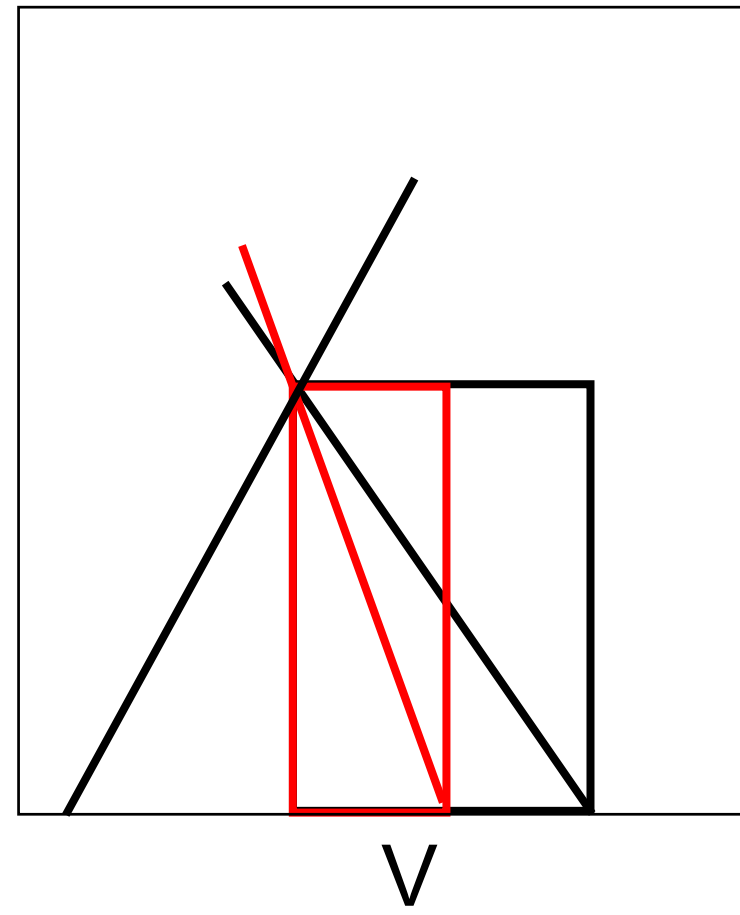


# CO一定における $E_{es}$ あるいはHR変化

$E_{es}$ 低下



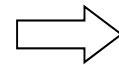
頻脈



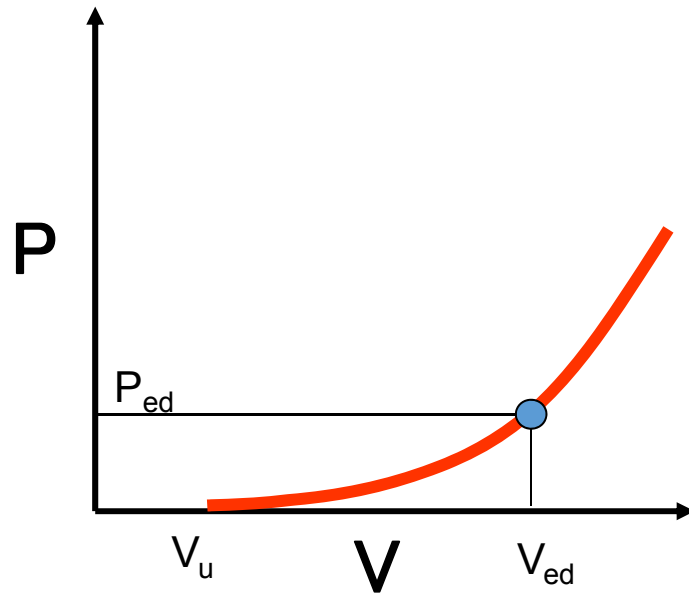
# 心室と静脈の結合

## 拡張末期圧容積関係 (EDPVR)

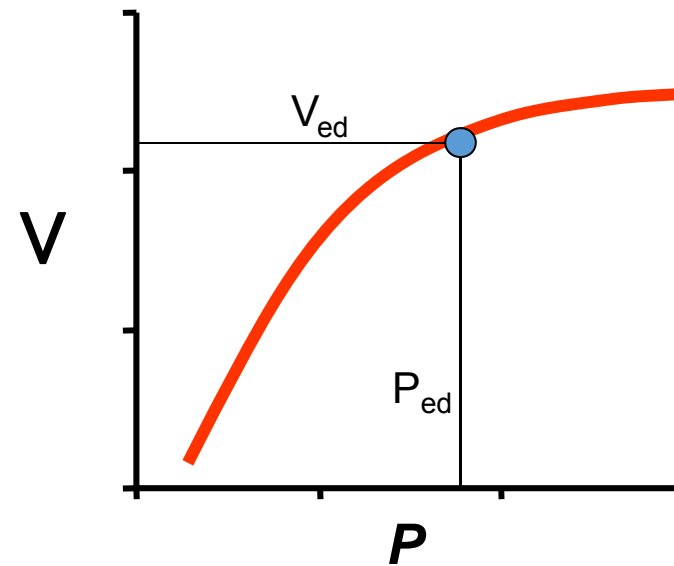
Exponential P-V



Logarithmic V-P



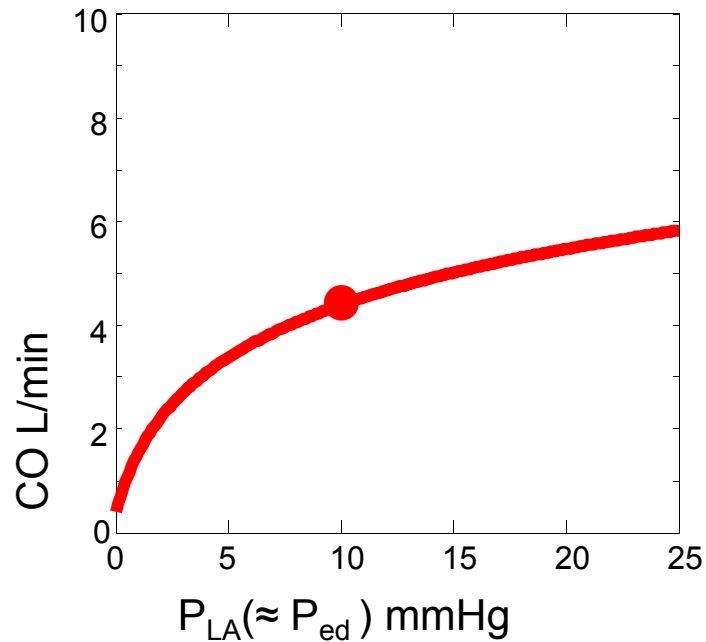
$$P_{ed} = e^{E_{ed}(V_{ed}-V_u)} - P_0$$



$$V_{ed} = \frac{\ln(P_{ed} + P_0)}{E_{ed}} + V_u$$

# 心拍出量曲線は対数曲線

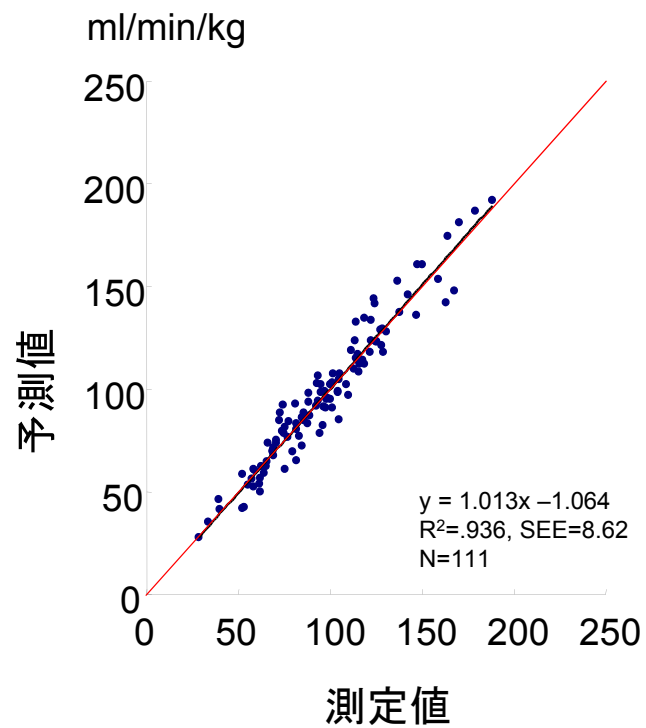
## Frank-Starling曲線の解析解



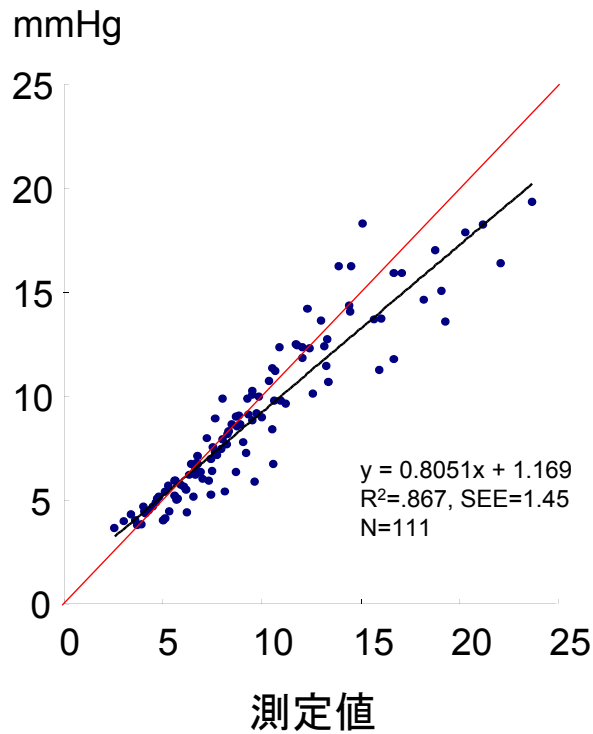
$$\begin{aligned} CO &= \frac{E_{es}}{TE_{es} + R} (V_{ed} - V_o) \times 60 \\ &= \frac{E_{es}}{TE_{es} + R} \left\{ \frac{\ln(P_{ed} - P_o)}{E_{ed}} + (V_u - V_o) \right\} \times 60 \\ &\approx \frac{E_{es} / E_{ed}}{TE_{es} + R} \ln(P_{ed} - P_o) \times 60 \end{aligned}$$

# モデルの予測精度

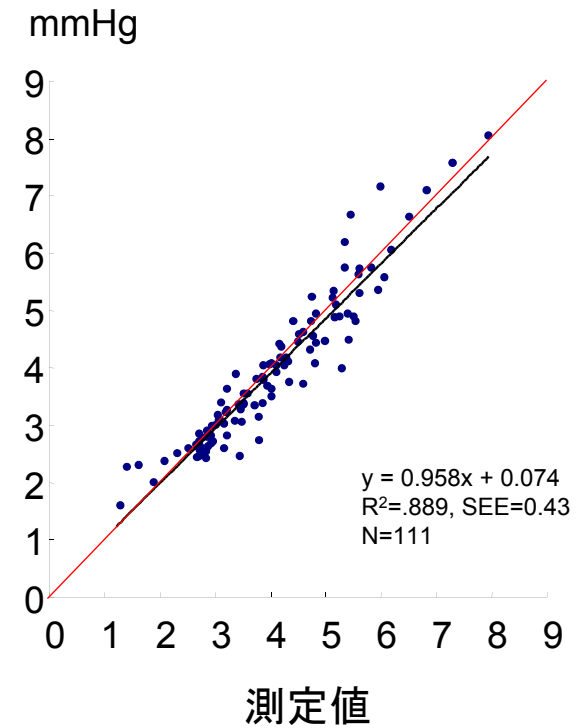
## 心拍出量



## 左房圧



## 右房圧



Uemura K et al., Am J Physiol 2005

# 理屈で語れたら免許皆伝！ 血行動態 演習問題 －圧容積関係の理解編－

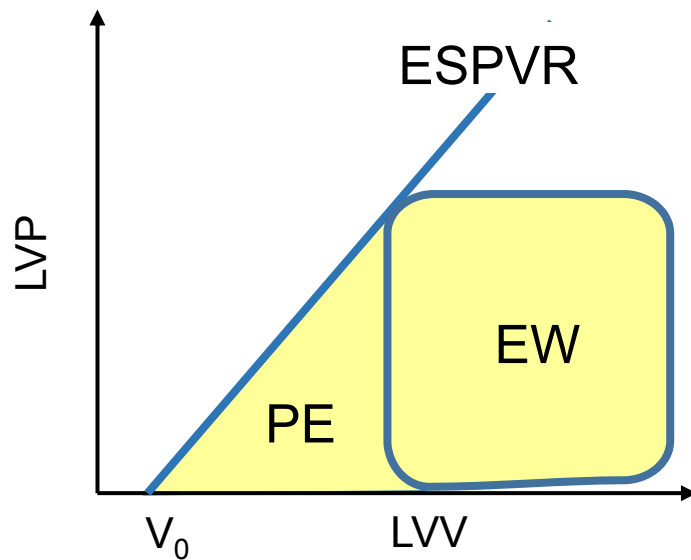
1.  $E_{es}$ が増加するとSVは？
2.  $V_{ed}$ が増加するとSVは？
3. Rが増加するとSVは？
4. HRが増加するとSVは？
5. 良い心臓のCOは前負荷依存、後負荷非依存の意味を説明してください。
6. 悪い心臓のCOは前負荷非依存、後負荷依存の意味を説明してください。
7. COが一定のときに $E_{es}$ が低下すると $V_{ed}$ は？
8. COが一定のときにHRが上がると $V_{ed}$ は？

解答を作図して  
みましょう！

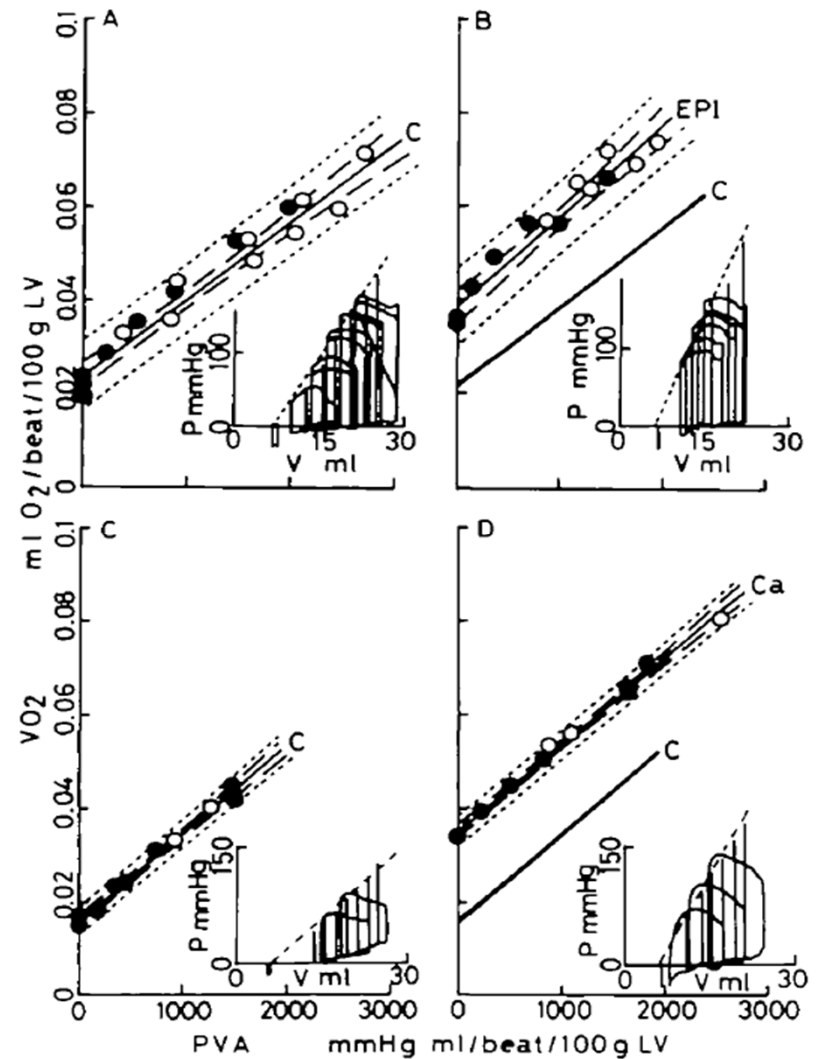


# 圧容積面積と心臓酸素消費

# 心収縮とエネルギー：PVAとMVO<sub>2</sub>

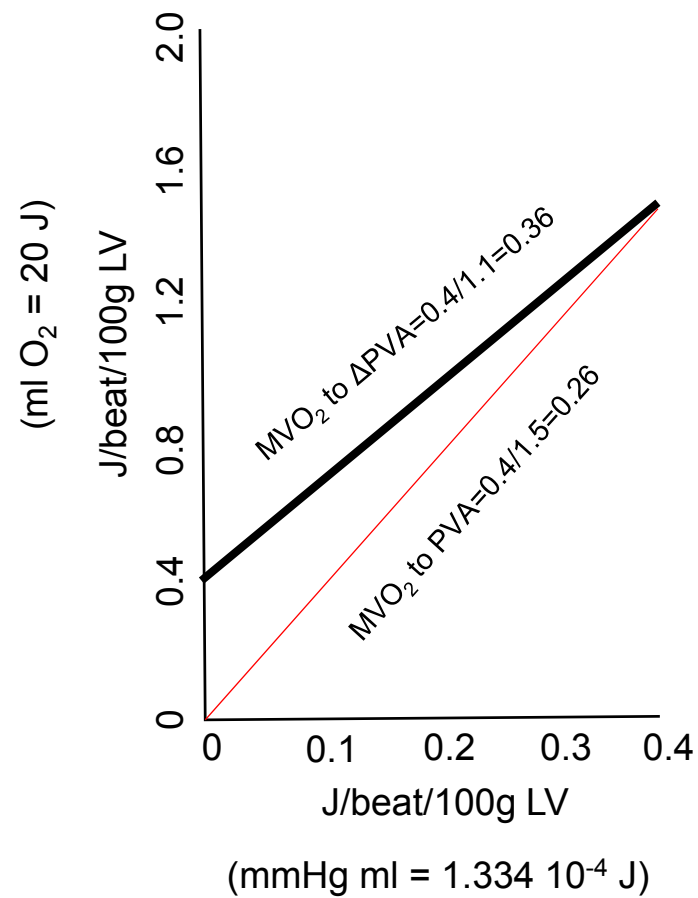
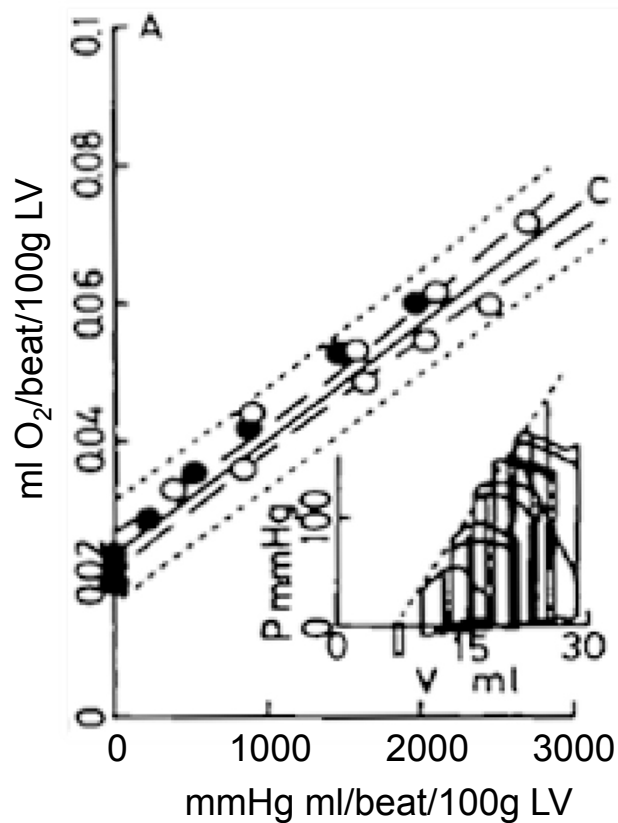


- Pressure-volume area (PVA) はMVO<sub>2</sub>/beat に比例する
- PVA=EW+PE
- 収縮性の増加はPVA非依存のMVO<sub>2</sub>を増やす
- $VO_2 = A \cdot PVA + B \cdot E_{es} + C$



Suga H et al, Circ Res 1983

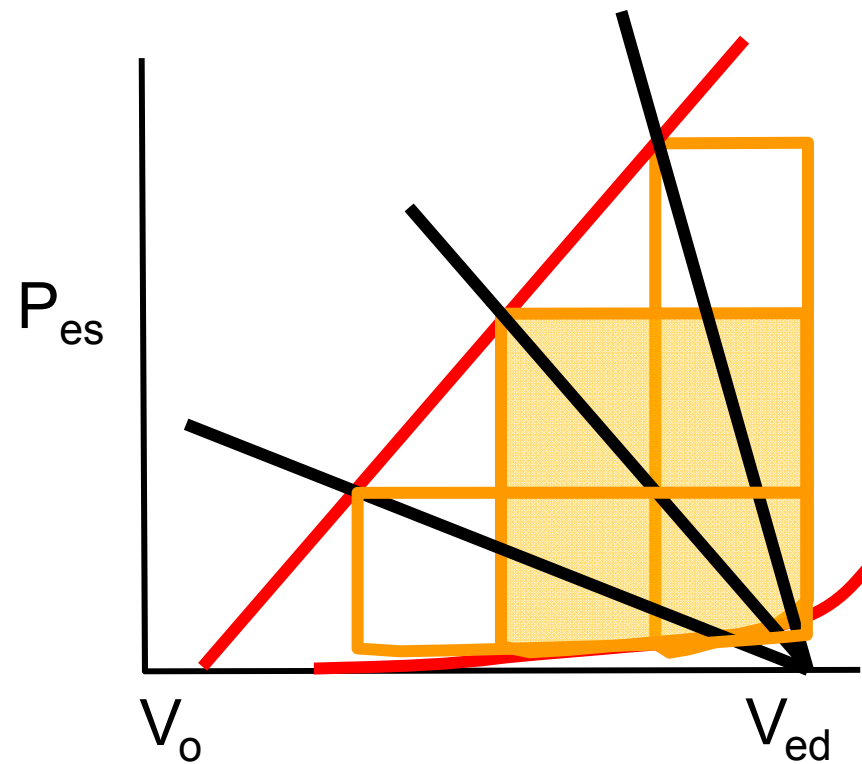
# 収縮のエネルギー効率の直接評価





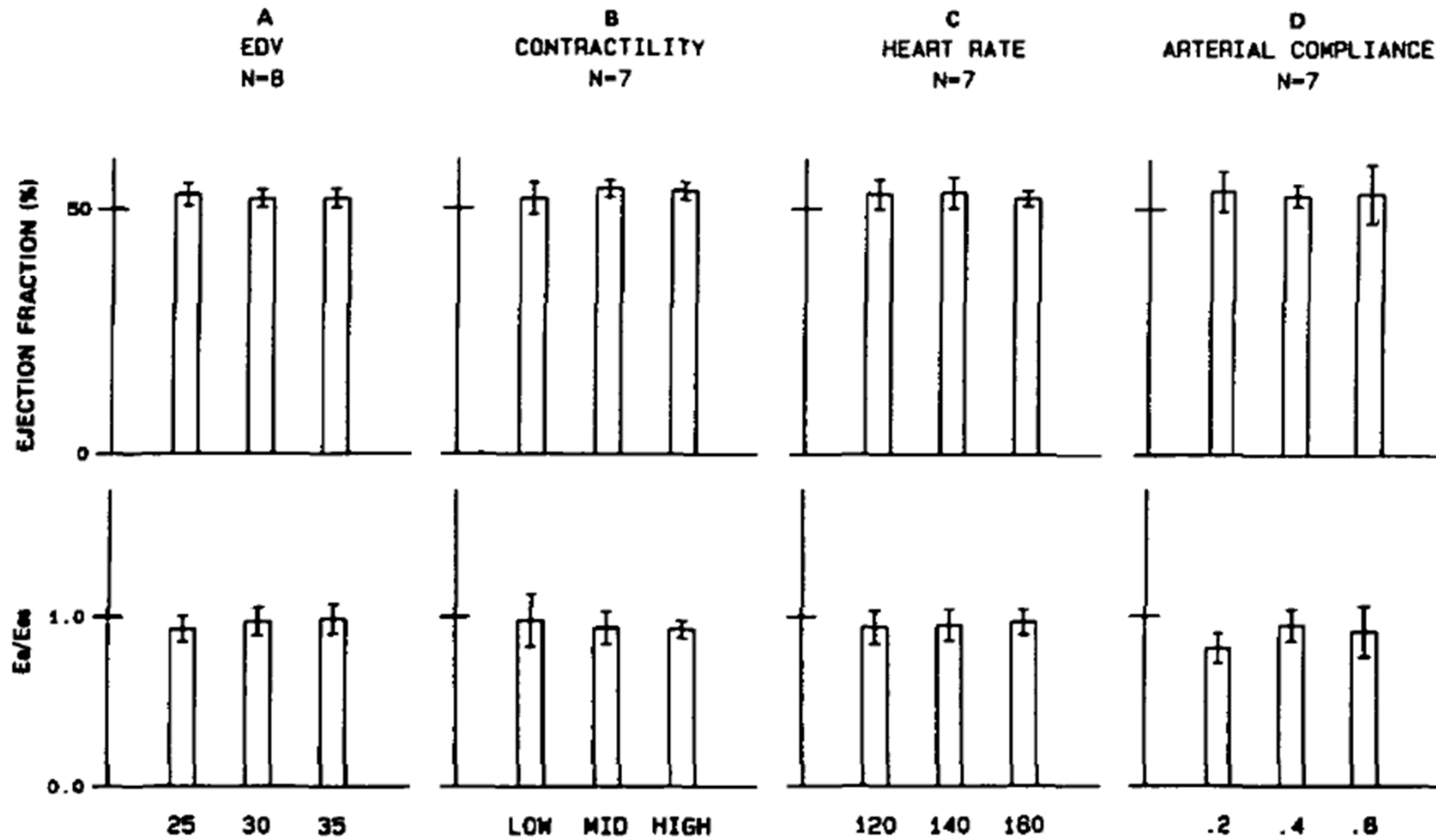
# 心臓から最大のエネルギーを取り出す負荷

理論的な予想



$E_a = E_s$  の時に SW 最大

# 最大SWにおけるEFと $E_a/E_{es}$



Sunagawa K et al., Circ Res 1985

# エネルギー効率

$$EW = E_{es} V_e^2 \frac{E_a/E_{es}}{(1 + E_a/E_{es})^2}$$

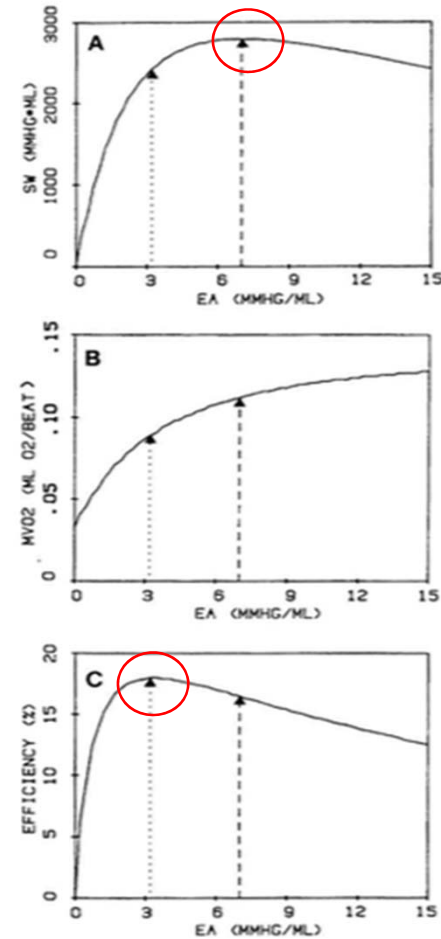
$$PVA = E_{es} V_e^2 \frac{E_a/E_{es}}{(1 + E_a/E_{es})^2} \left(1 + \frac{E_a/E_{es}}{2}\right)$$

$$\frac{EW}{VO_2} = \frac{1}{a\left(1 + \frac{E_a/E_{es}}{2}\right) + \frac{b(1 + E_a/E_{es})^2}{E_a V_e^2}}$$

where

$E_{es}=7$  mmHg/ml,  $V_e=40$  ml  
 $a=1.9 \times 10^{-3}$  ml of  $O_2$ /mmHg · ml  
 $b=0.033$  ml of  $O_2$ /beat

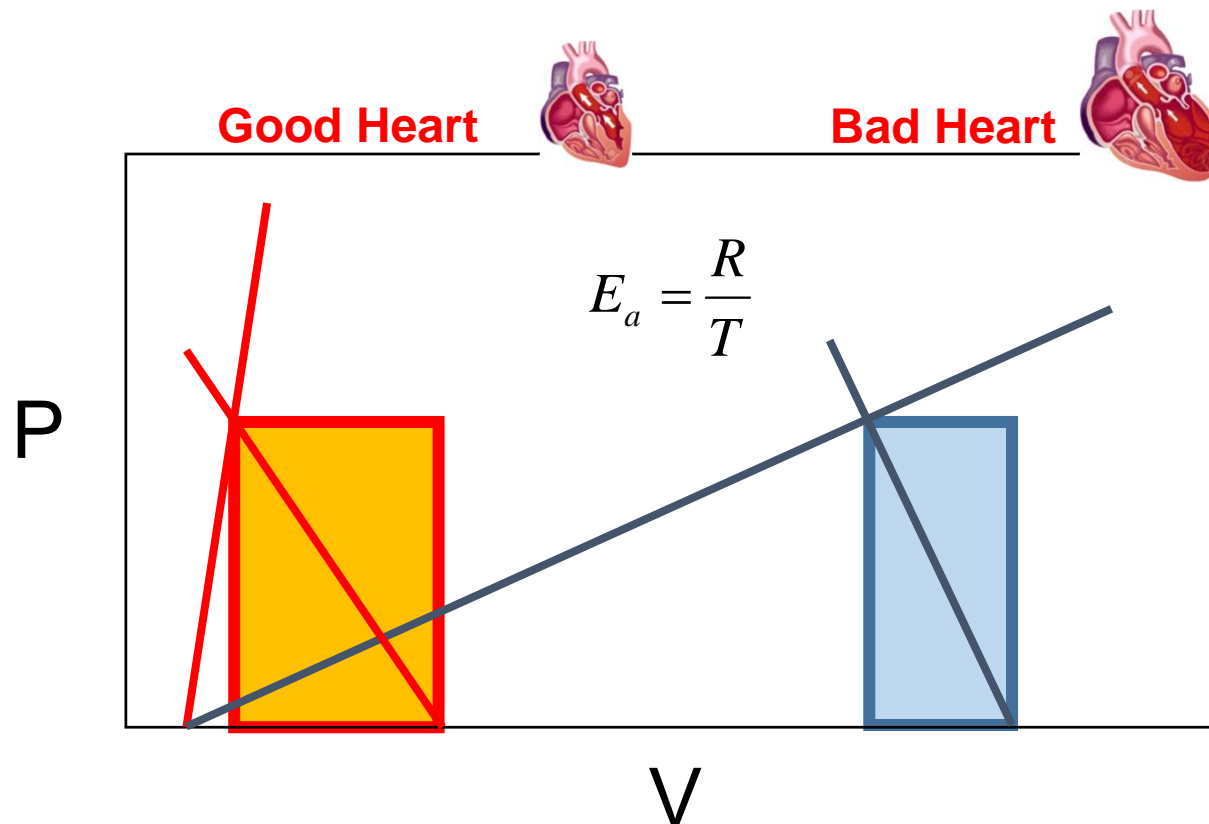
- $E_{es}=E_a$  でSW最大
- $E_{es}=2E_a$  でエネルギー効率最大



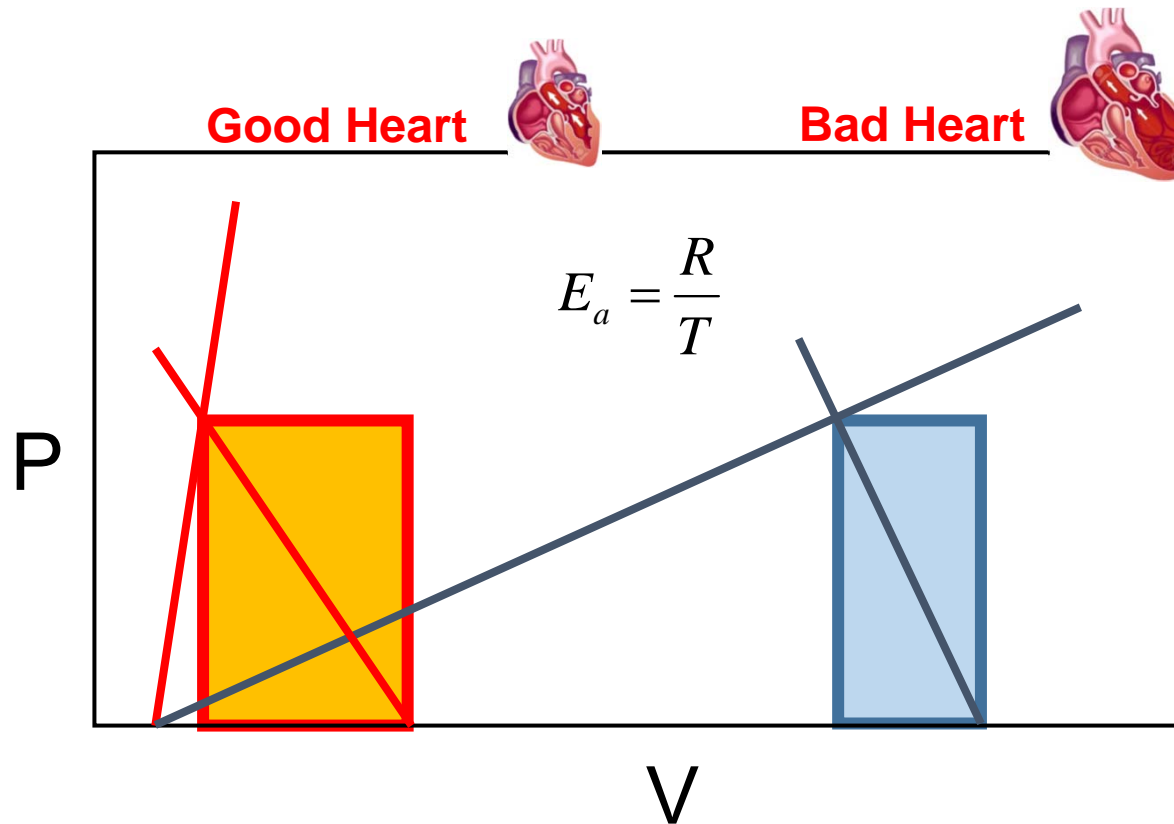
Burkhoff D and Sagawa K, Am J Physiol Reg 1986

# 心不全では心室と動脈はmismatch

諸悪の根源は交感神経緊張



# HFREF治療薬(β遮断薬、ACEI、ARB、MRB、徐脈薬)はmatchingを改善する



Matchingの改善が治療効果に貢献しているかどうかは証明されていない。

# 理詰めで考え、演習問題や思考実験を繰り返せば自ずと免許皆伝

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(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

理屈で語れたら免許皆伝！  
血行動態「うそ」・「ほんと」演習問題 10選

1. 大型動物ほど代謝率(cal/kg/min)は低い。
2. 心拡大でエラスタンスは低下？
3. 大人と子供ではどちらが血管抵抗は高い？
4. 移植心の患者は心臓神経支配がないため、起立性低血圧を起こしやすい
5. 一般に脈拍を上げるとCOは増加する
6. 運動中でも心室動脈結合はほぼ至適に保たれる
7. 正常な大人の心臓を子供に移植すると駆出率は低下し、心拍出量も低下する
8. 駆出率は前負荷に依存する
9. 血圧は快晴であがり、嵐で下がる
10. 徐脈薬でも梗塞サイズは縮小する

条件付き「うそ」  
「ほんと」  
もあります！

