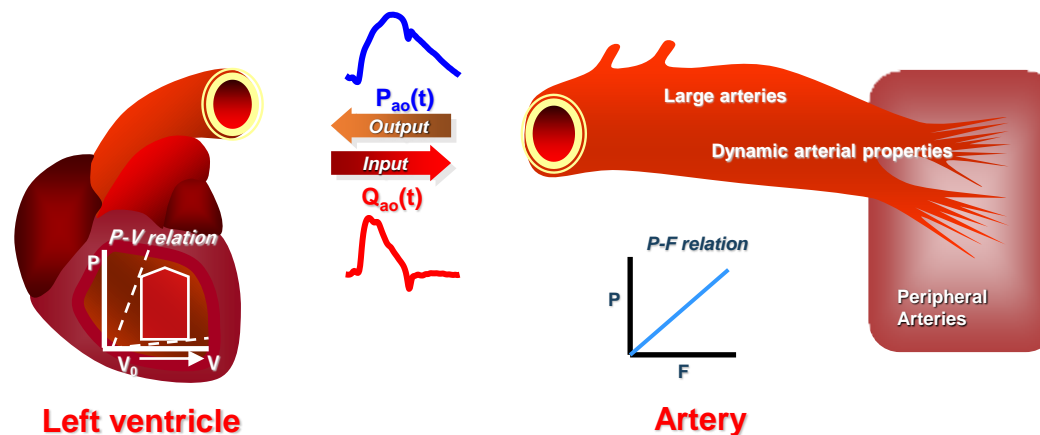


# 後負荷を識る、使う、超える

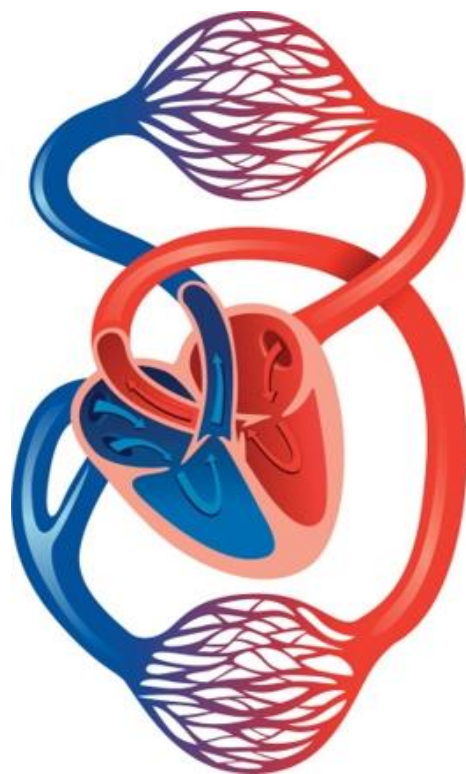
大胆な単純化で見えてくる異次元の世界



循環制御システム研究機構

砂川賢二

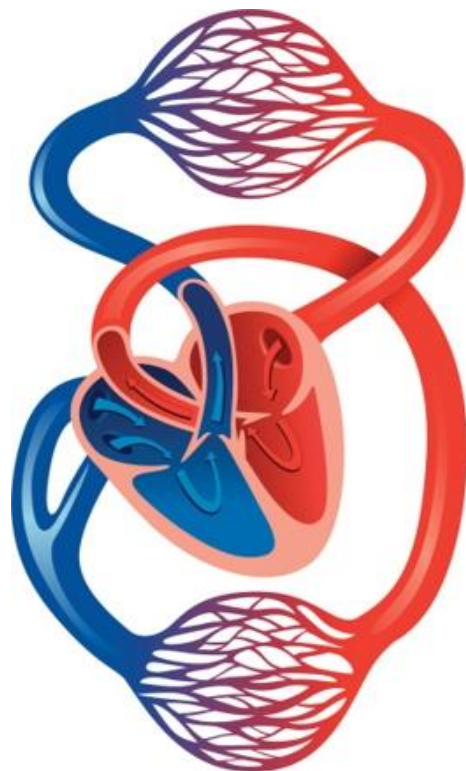
# 後負荷を語る前に循環器系の設計目標の確認



- 恒常性を保つのに必要な心拍出量を生み出す



# 優れた後負荷の指標の条件



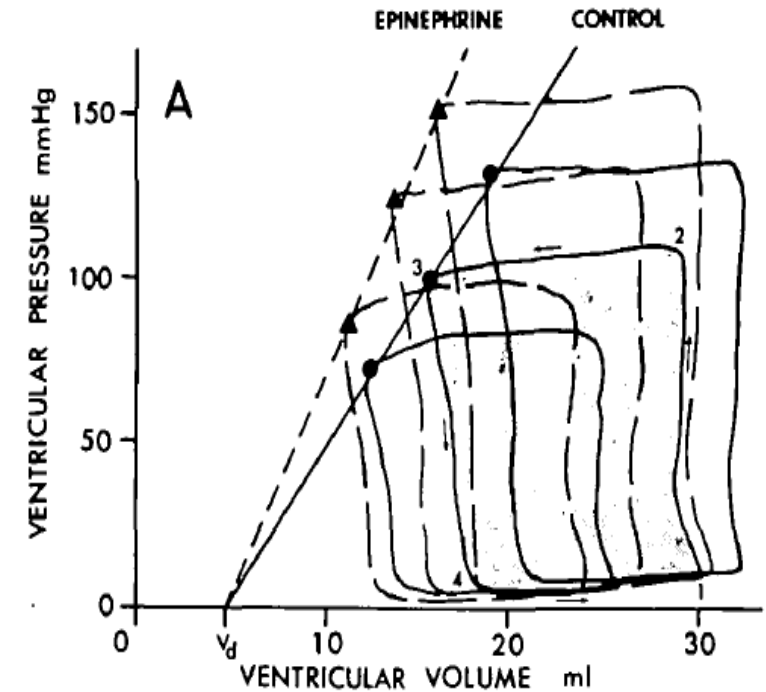
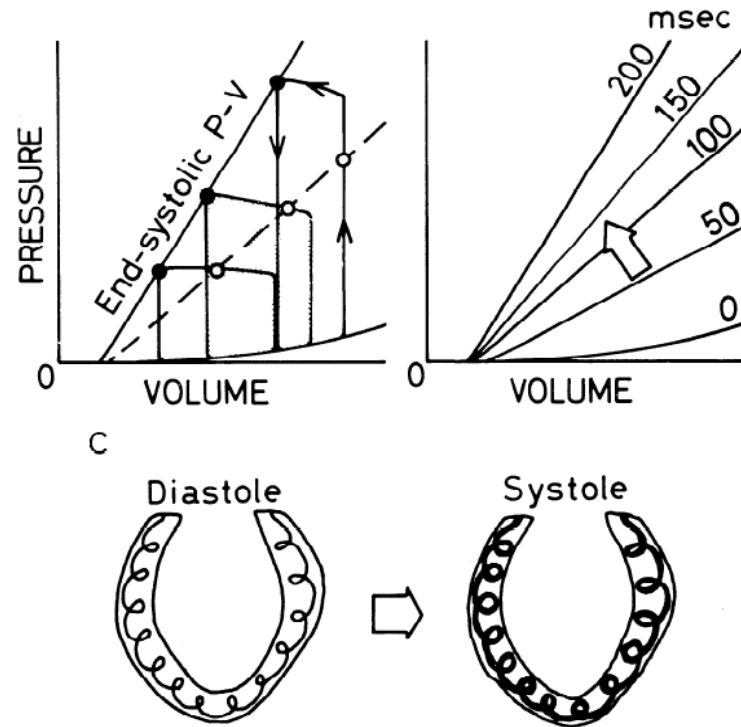
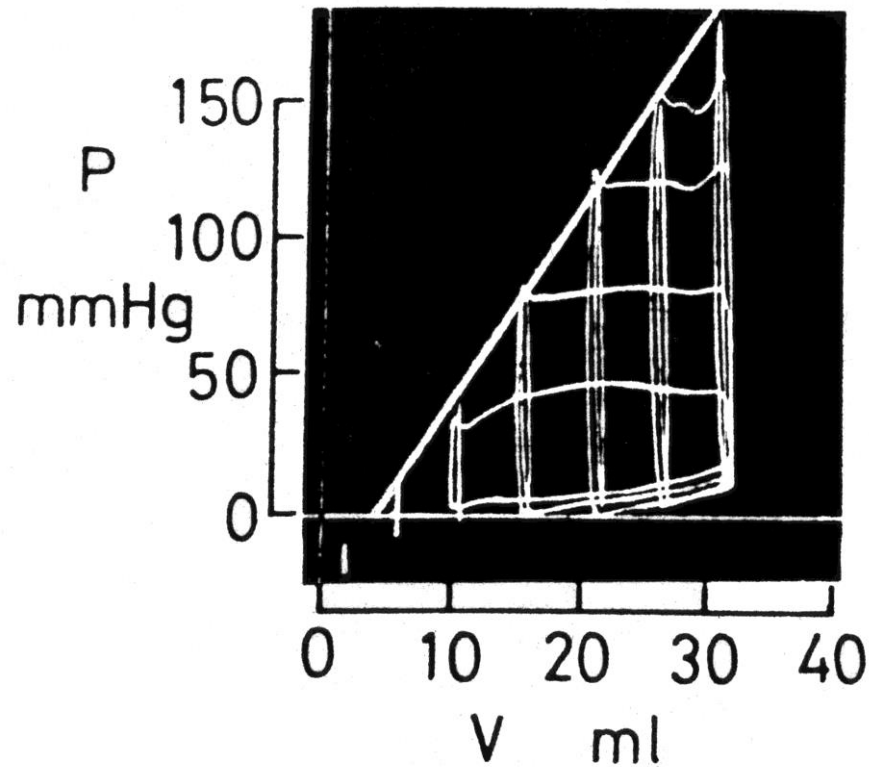
- 血行動態 (SV、CO、AP、EF) や代謝 (MVO<sub>2</sub>) の理解が出来る—**理解・診断を助ける後負荷指標**
- 介入に対して血行動態の応答が予測ができる—**治療に貢献する後負荷指標**

# 心臓の特性: 収縮末期圧容積関係 (ESPVR)

ESPVRは直線で負荷非依存

心室は時変エラストランス

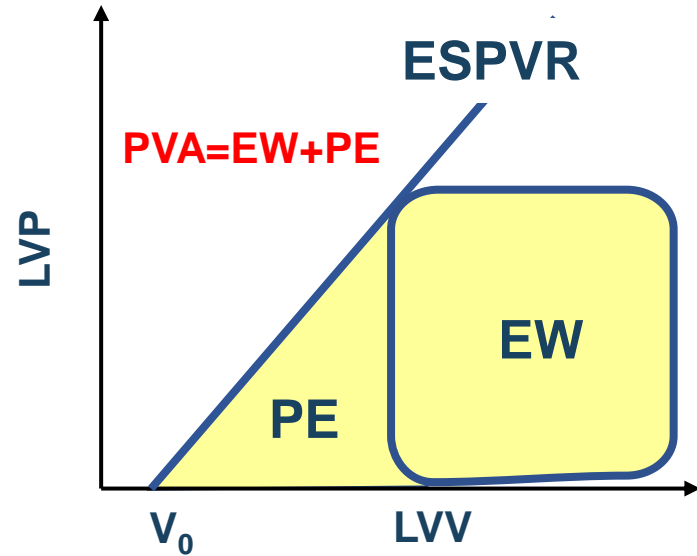
ESPVRは収縮性の指標



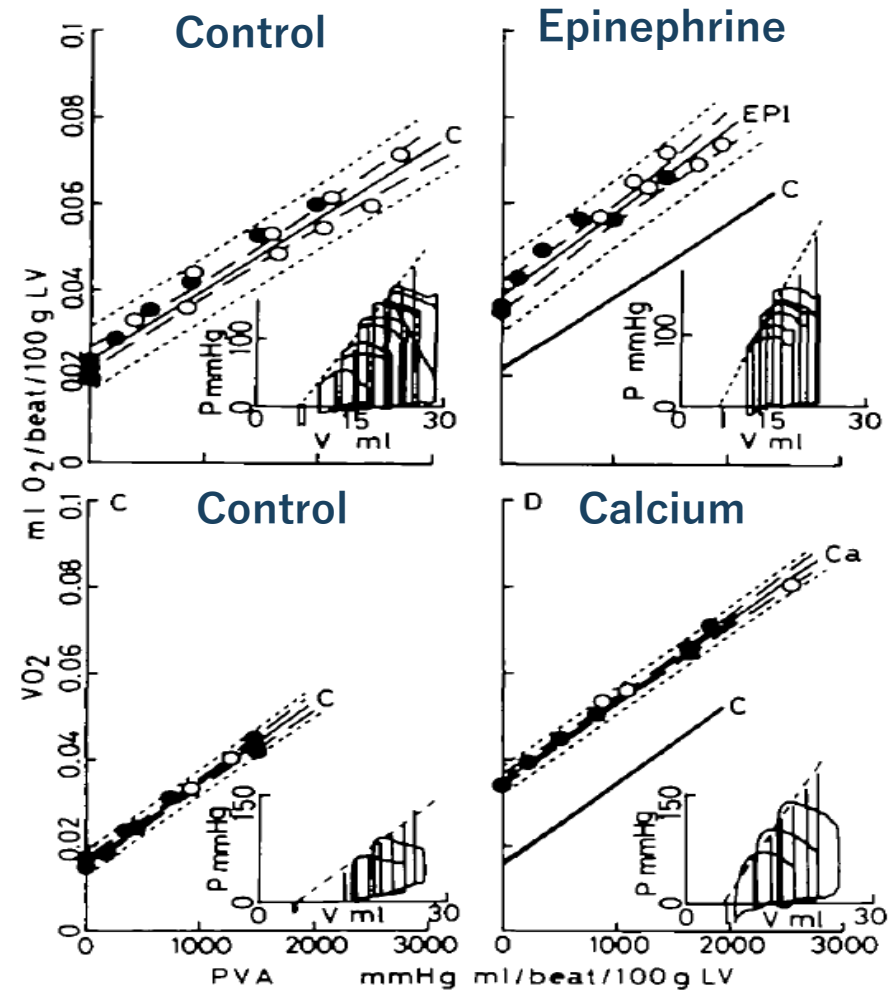
Suga H et al. Am J Physiol 1979

Suga H et al. Circ Res 1973

# 心室の酸素消費：圧容積面積 PVAは代謝の窓

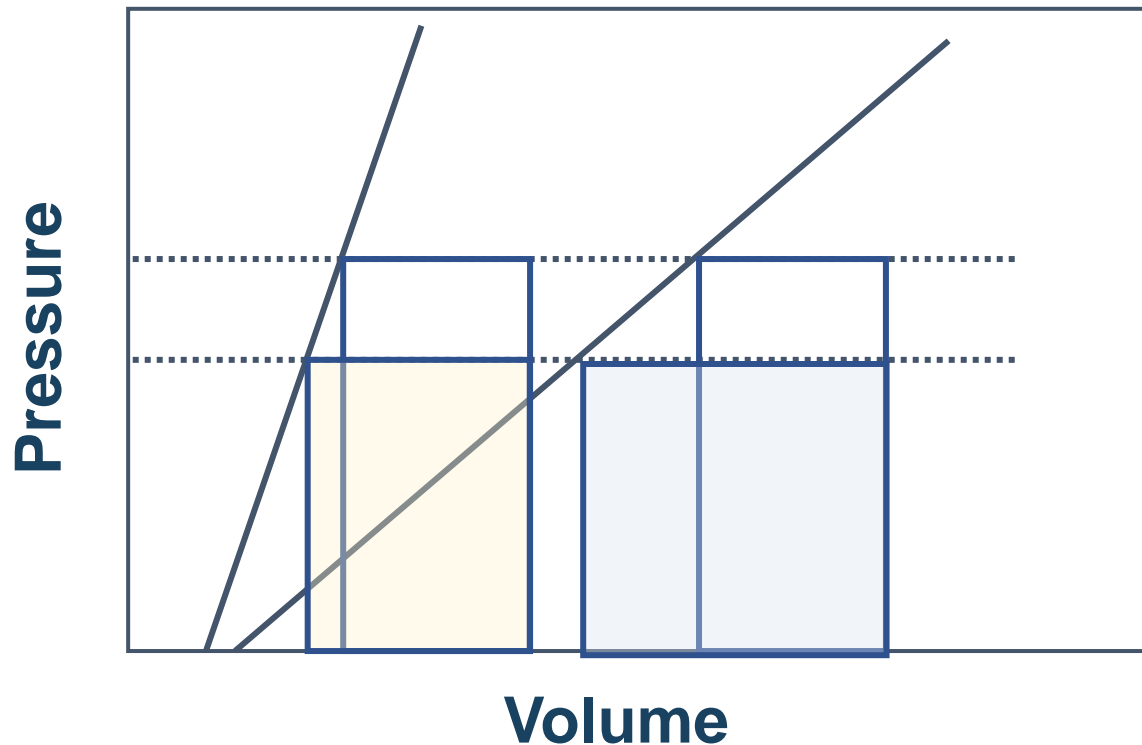


- 圧容積面積 Pressure-volume area (PVA) は心室酸素消費量  $MVO_2/\text{beat}$  に比例する (代謝の窓)
- 収縮性の増加はPVA非依存の  $MVO_2$  を増やす
- $VO_2/\text{beat} = A \cdot PVA + B \cdot E_{es} + C$
- $VO_2/\text{min} = (A \cdot PVA + B \cdot E_{es} + C) \cdot HR$



Suga H et al, Circ Res 1983

# 候補 1: 血圧

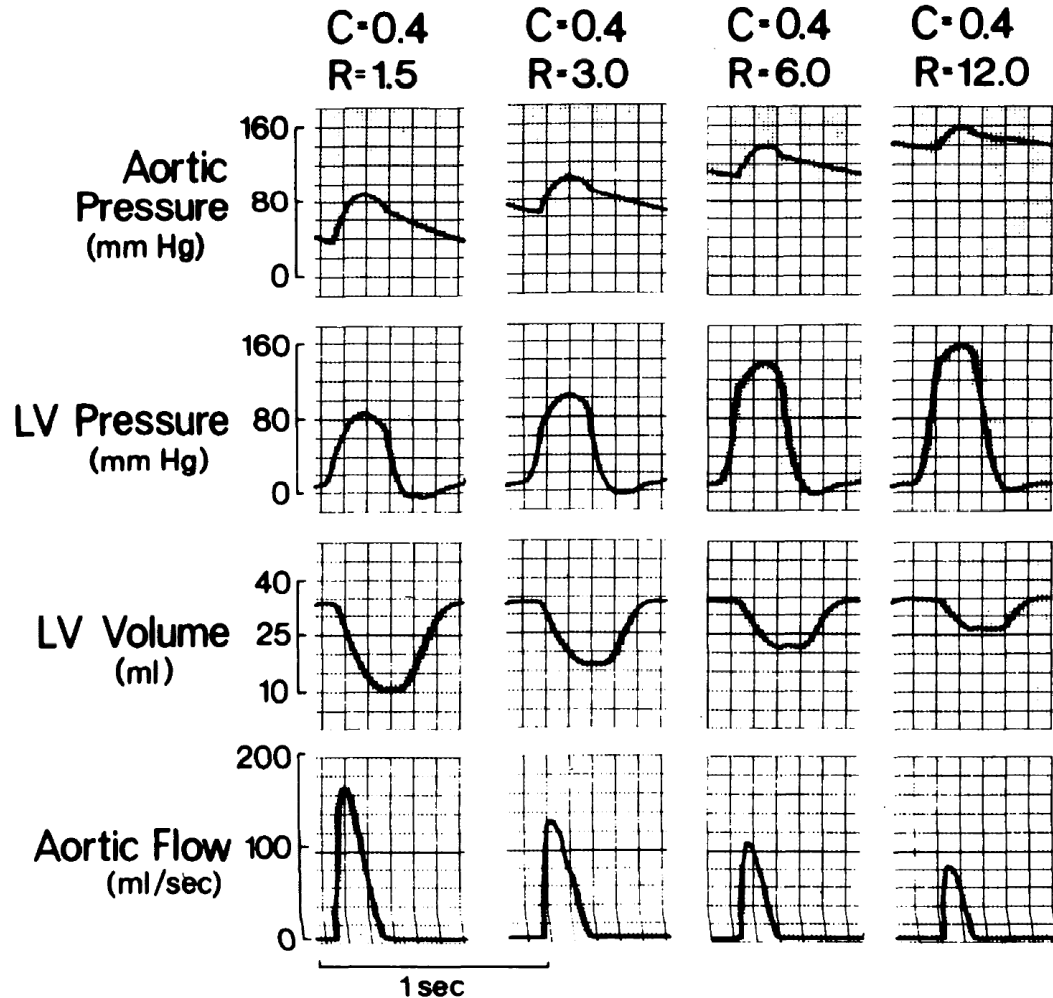


## 強みと弱み

- 収縮末期容積を規定
- 圧変動による収縮末期容積を予測
- 血行動態の理解に繋がらない
- 動脈の機械特性を反映しないため、治療介入の血行動態や代謝への効果が予測できない。
- 診断的価値、治療的価値は限定的

# 候補 2: 血管抵抗

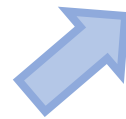
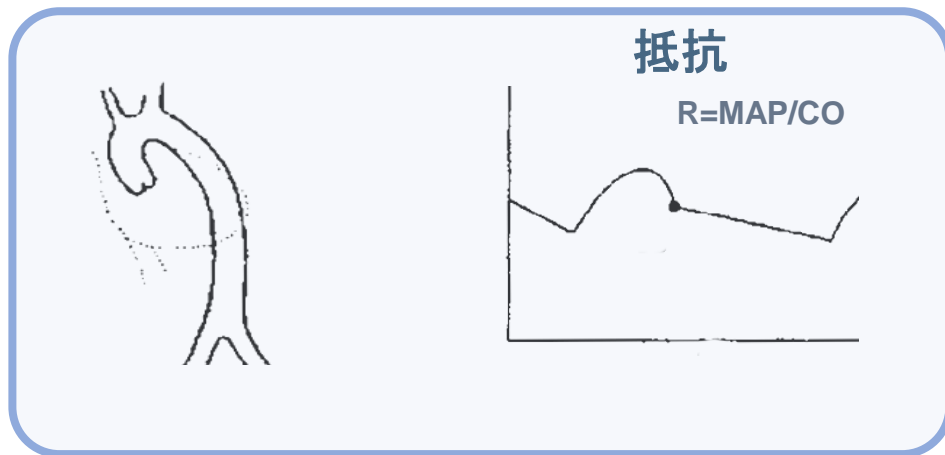
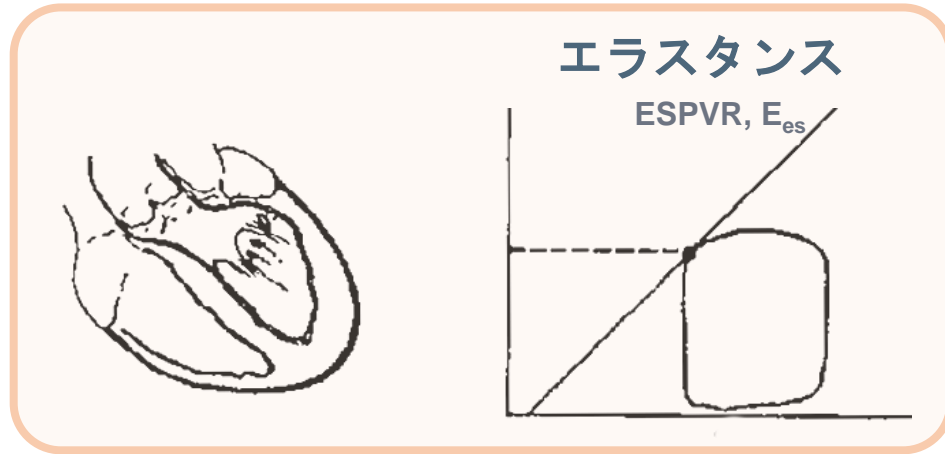
## 強みと弱み



- 動脈の機械特性を反映
- 血行動態 (SV、CO、AP、EF) や代謝 (MVO<sub>2</sub>) を定性的に理解できる。診断的な価値は限定的。
- 定量的に血行動態やMVO<sub>2</sub>を理解することは困難
- 治療介入に対する血行動態やMVO<sub>2</sub>の応答の予測は困難



# 候補 3: 実効動脈エラスタンス $E_a$



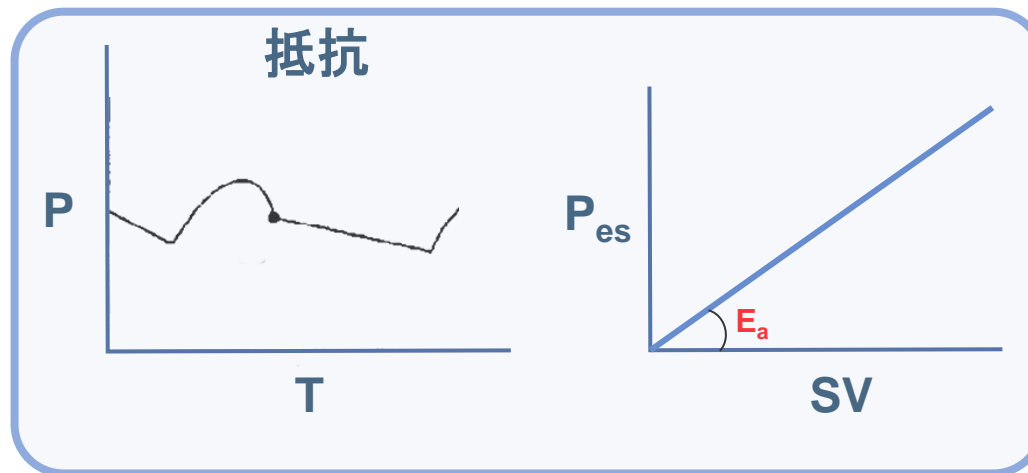
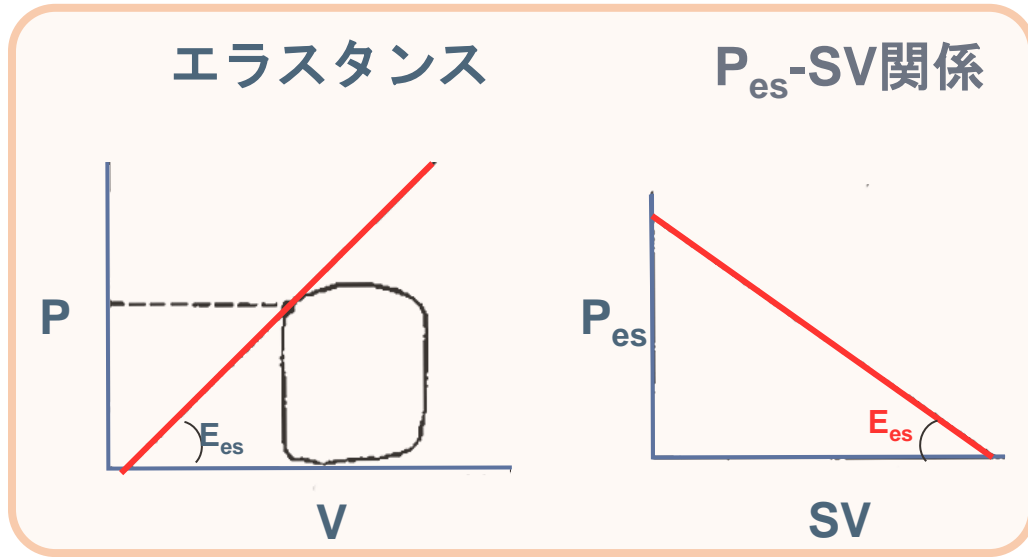
相互作用



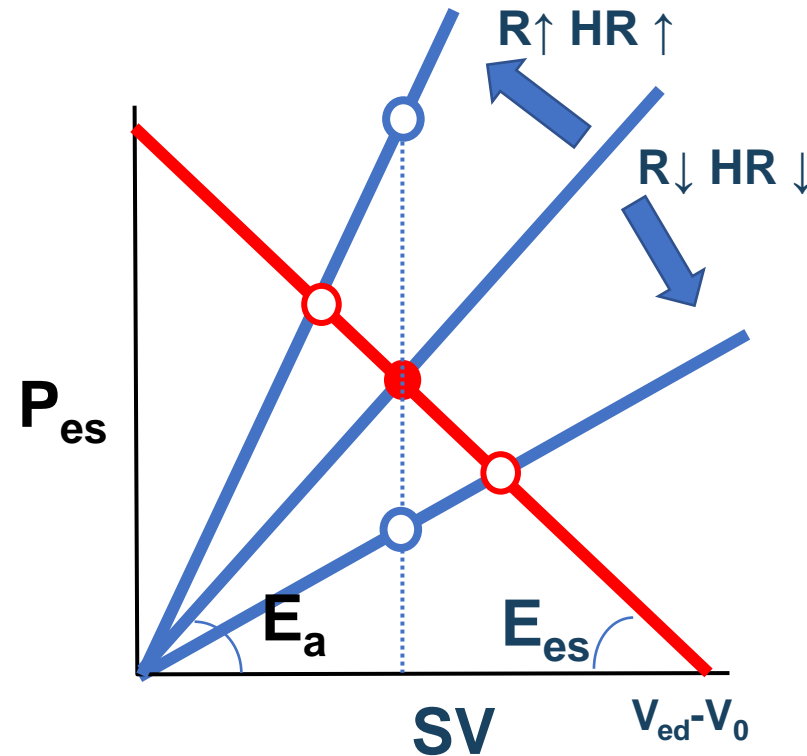
残念。次元が異なり血行動態の予測ができない。



# 大胆な発想の転換、動脈のエラスタンس化



## 実効動脈エラスタンスの秘密



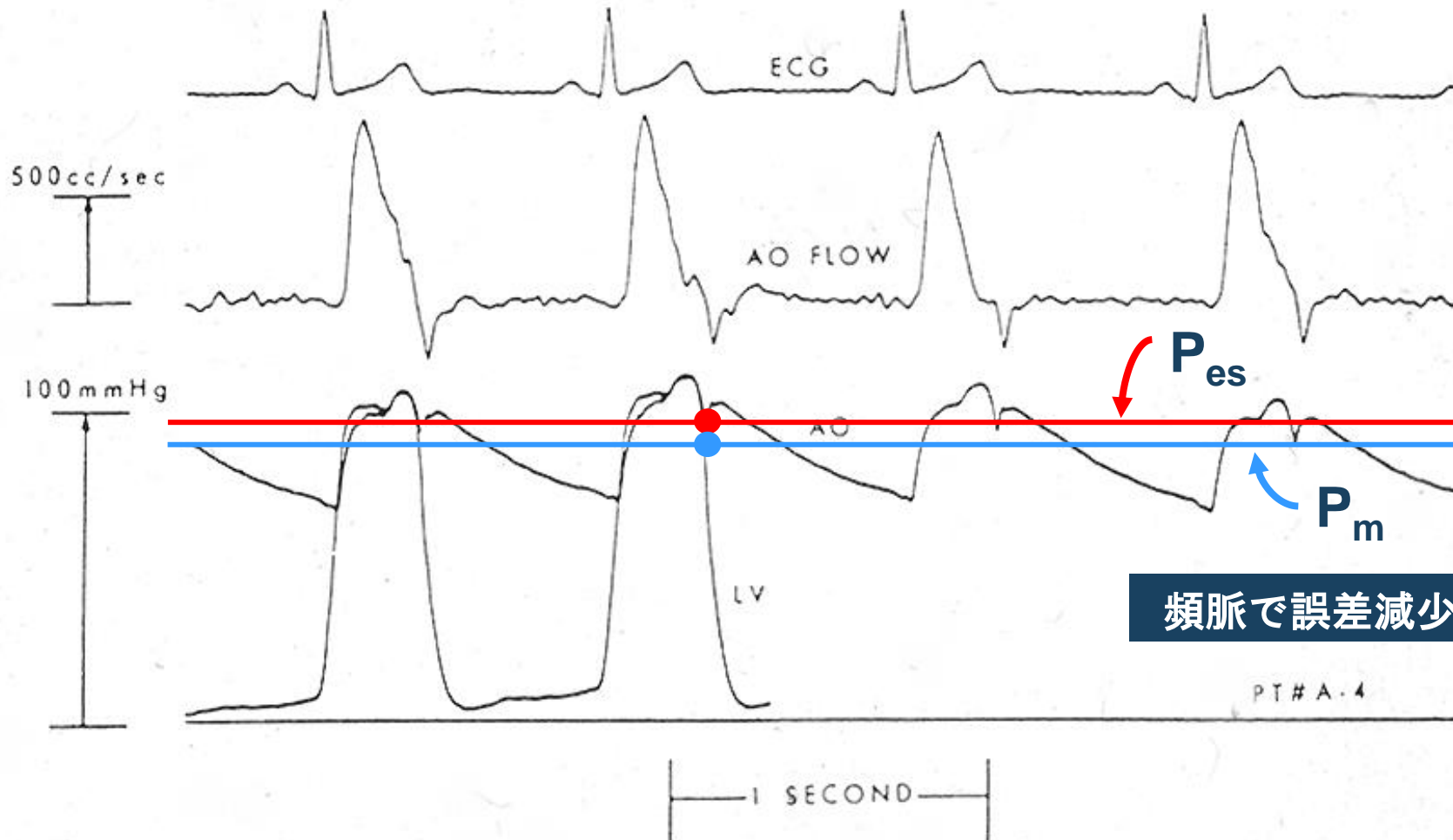
$E_a$ 誕生!!!



R、HRと $E_a$ の定量的関係は？

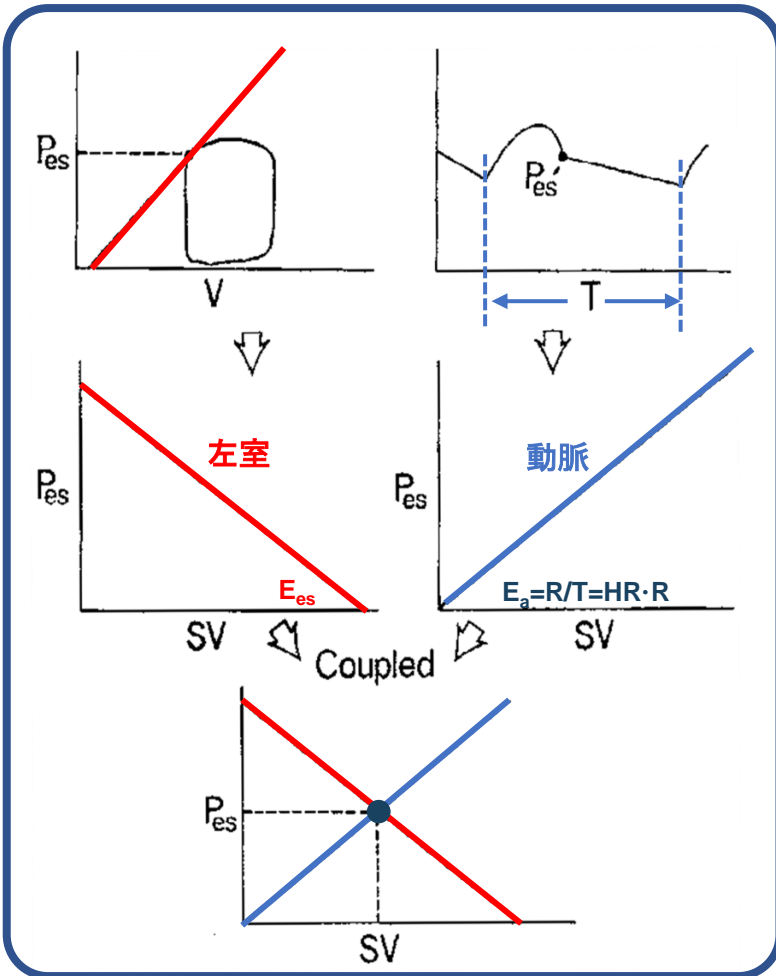
# 実効動脈エラスタンス $E_a$ に定量性の導入

平均血圧と収縮末期圧は近い  $P_{es} \approx P_m$



# 動脈のエラスタンス化による心室動脈結合

## 枠組み



## 解析式

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

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

$$P_{es} \approx P_m$$

$$= R \cdot F = R \frac{SV}{T}$$

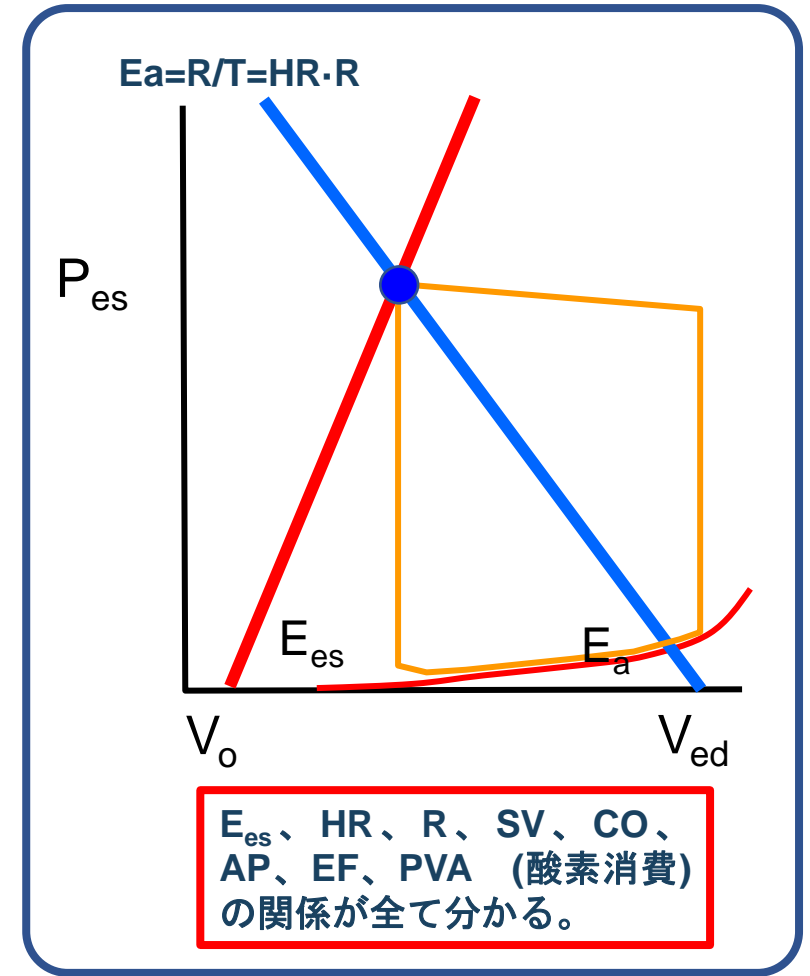
$$= \frac{R}{T} SV = HR \cdot R \cdot SV$$

$$= E_a SV$$

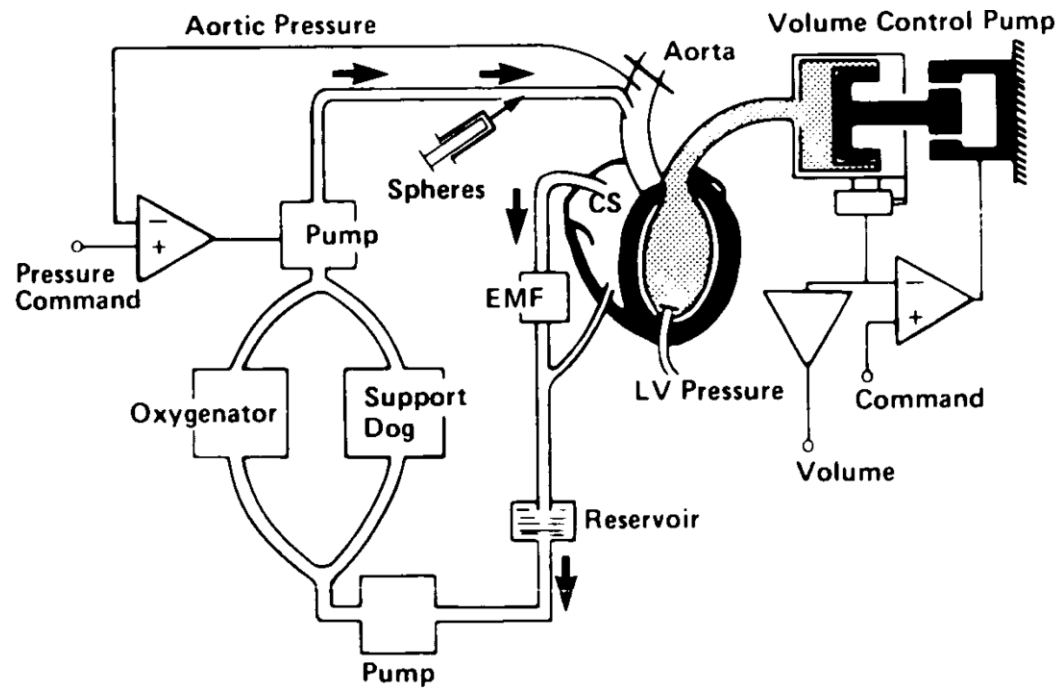
$$SV = \frac{E_{es}}{E_{es} + E_a} (V_{ed} - V_0)$$

$$= \frac{E_{es}}{E_{es} + \frac{R}{T}} (V_{ed} - V_0)$$

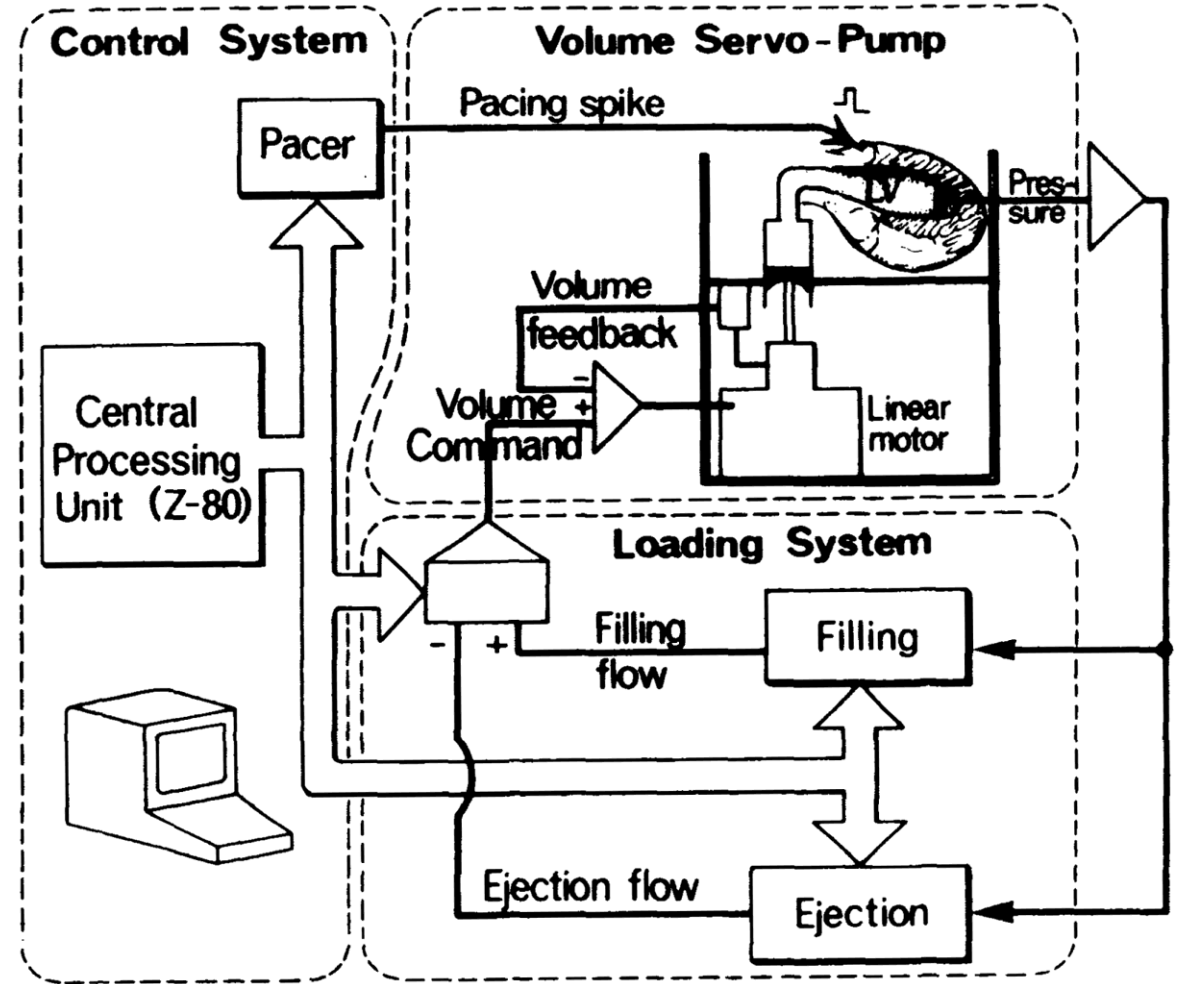
## 作図解



# 精度検証に不可欠な高精度心室負荷装置

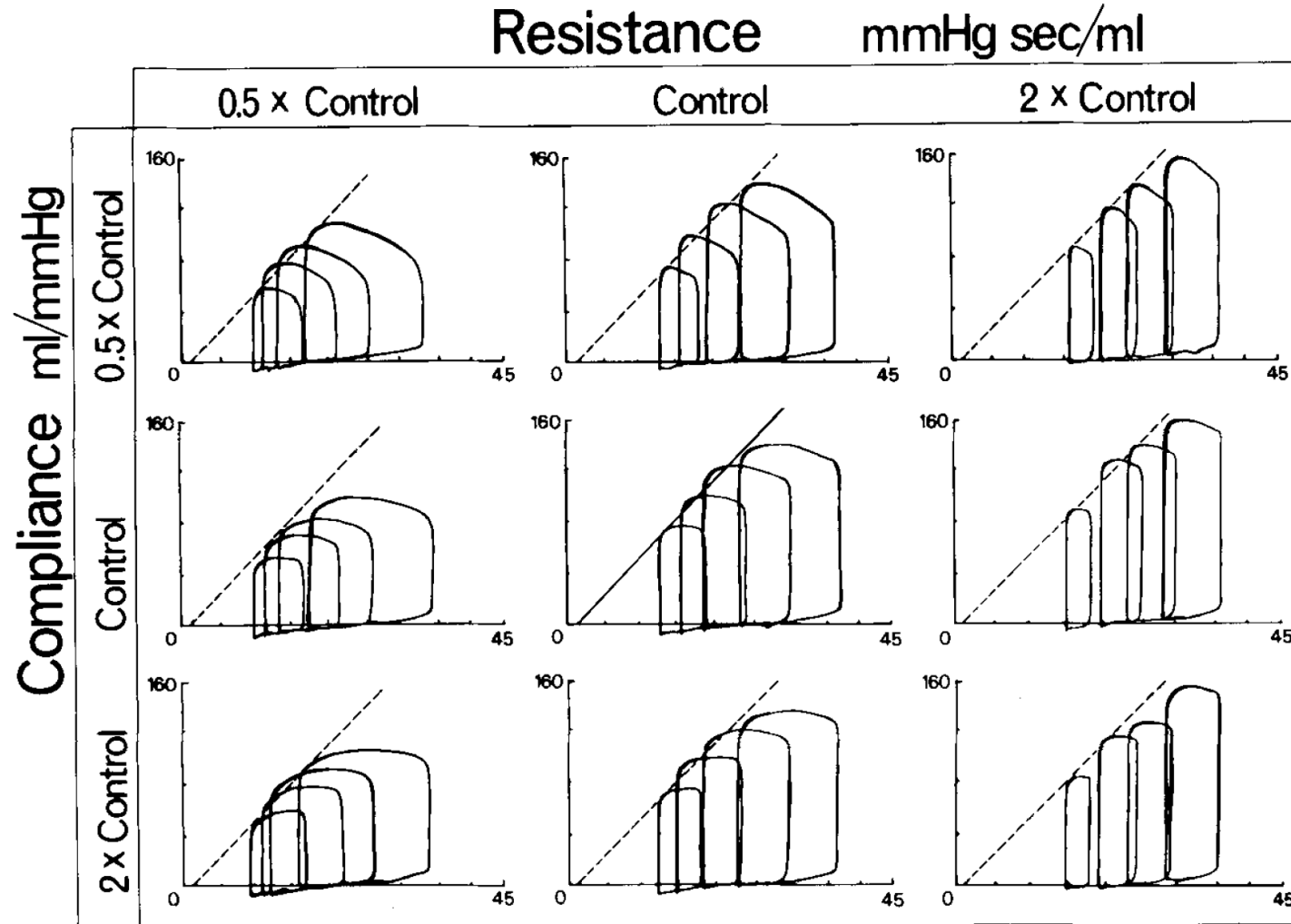


Sunagawa K et al., Circ Res 1983



Sunagawa K, Am J Physiol 1982

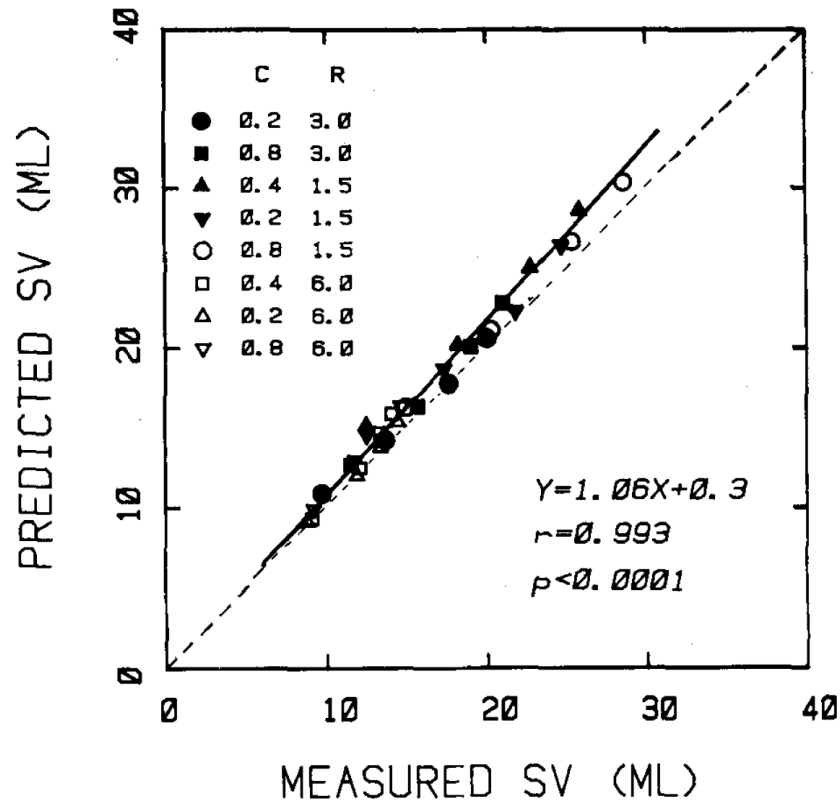
# 再現された Pressure-volume loops



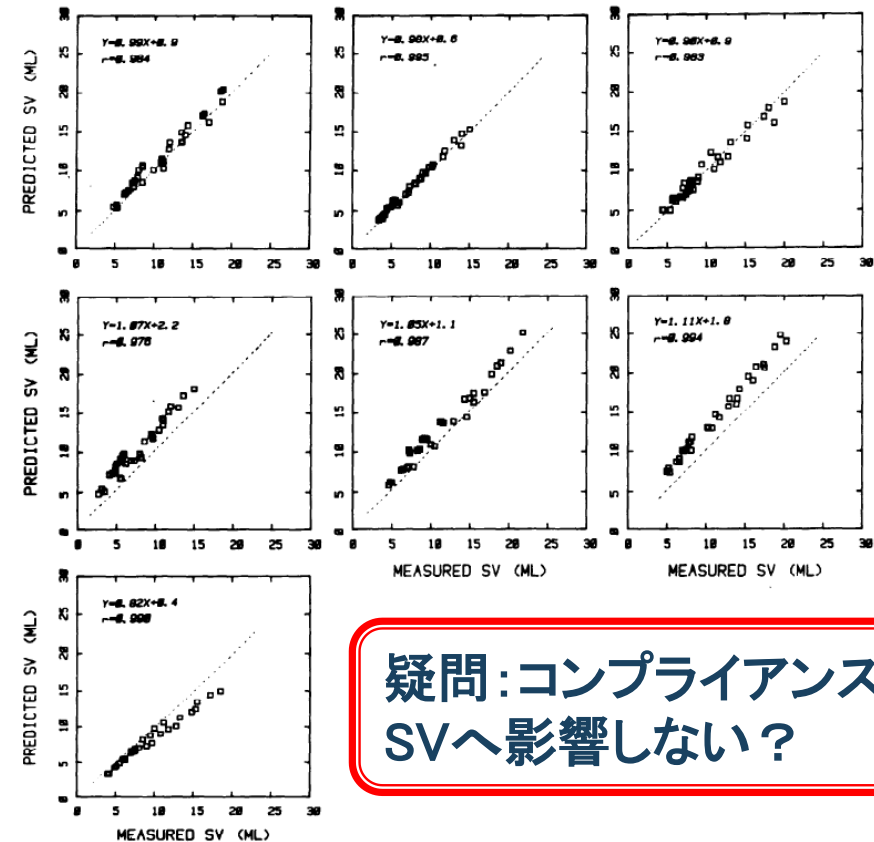
Maughan WL, Circulation 1985

# $E_a$ による心室動脈結合は正確にSVを推定

$E_{es}$ 、HR、R、EDVからSVを予測



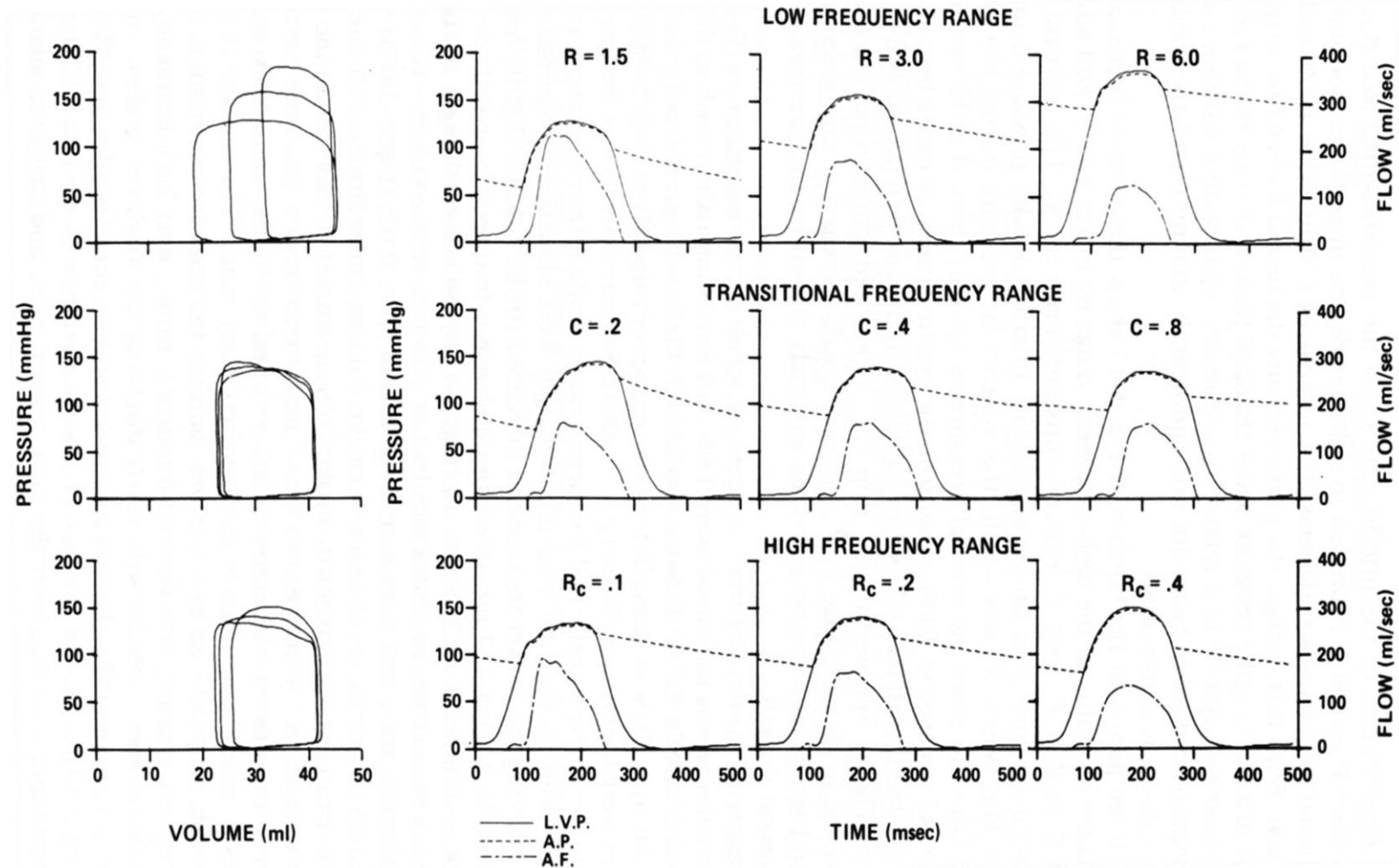
Maughan WL, Circulation 1985



疑問:コンプライアンスはSVへ影響しない?

Sunagawa K et al., Am J Physiol 1983

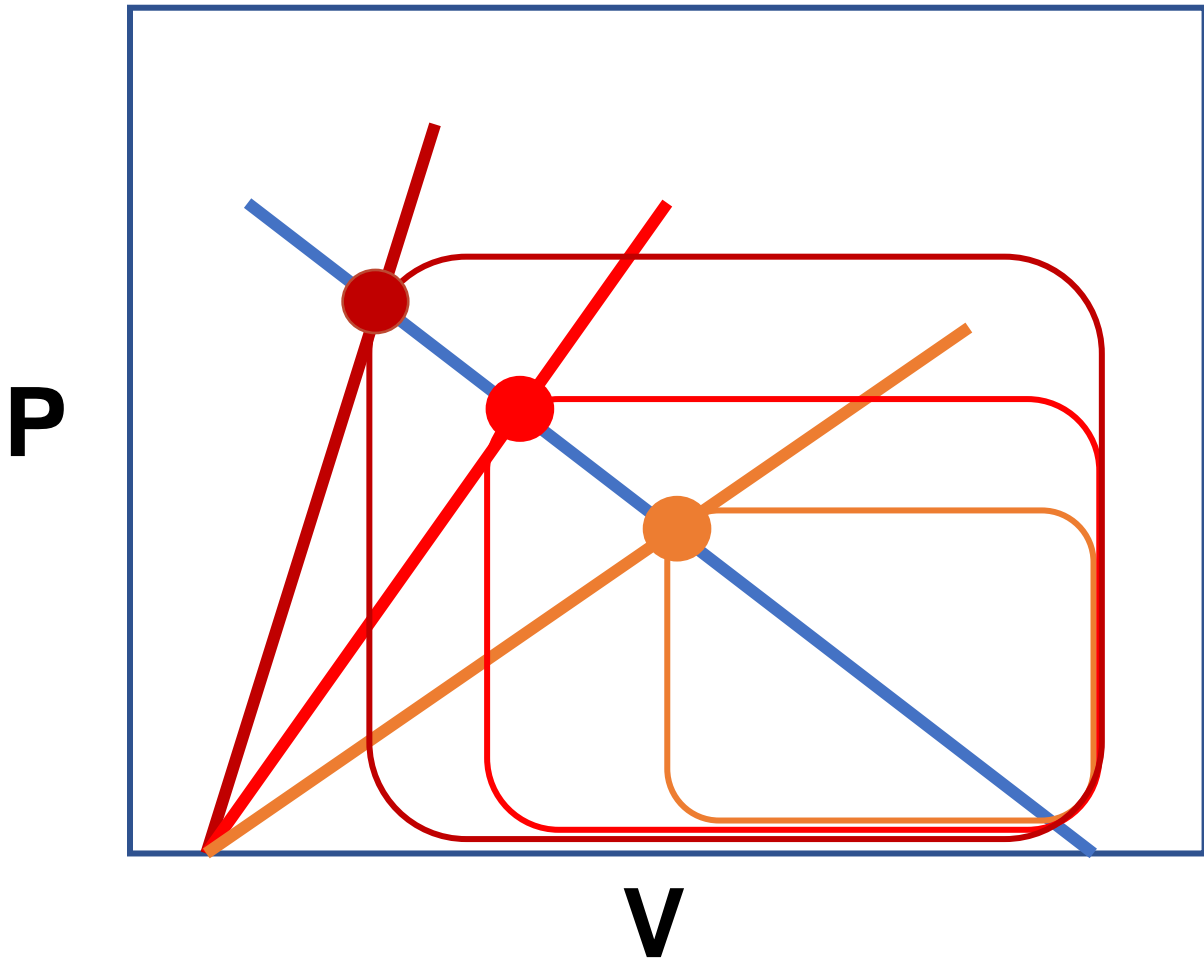
# C変化のSVへの影響は限定的



Sunagawa K et al., Am J Physiol 1985



# 心臓と後負荷の相互作用、収縮性 $E_{es}$



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

$$= \frac{E_{es}}{E_{es} + \frac{R}{T}} (V_{ed} - V_0)$$

$$E_a = \frac{R}{T} = HR \cdot R^*$$

$$CO = SV \cdot HR$$

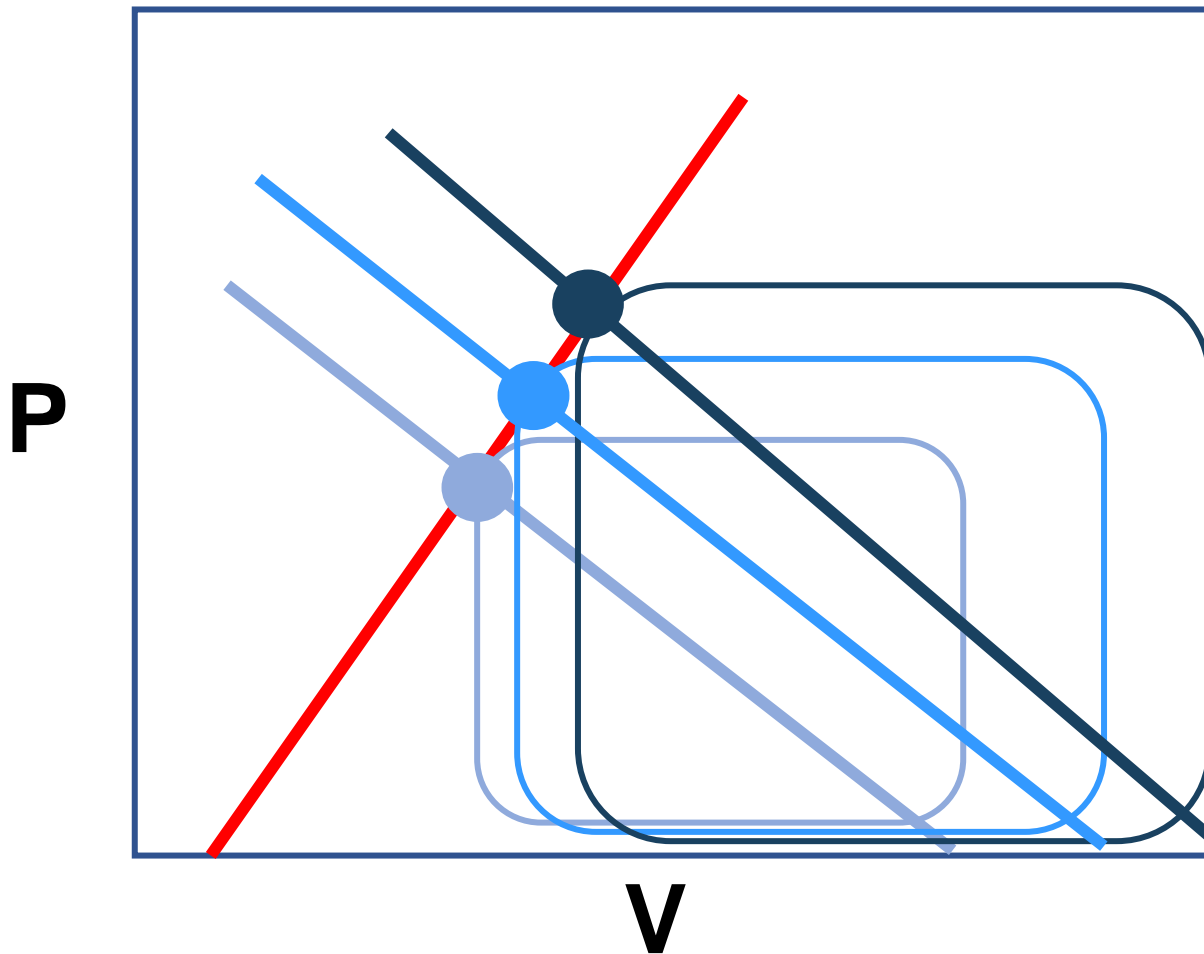
$$EF = \frac{SV}{V_{ed}} \approx \frac{E_{es}}{E_{es} + E_a} = \frac{E_{es}}{E_{es} + HR \cdot R^*}$$

R=mmHg/ml/s, R\*=mmHg/ml/m

**収縮性  $E_{es}$  増加**

$E_a \rightarrow SV \uparrow CO \uparrow BP \uparrow EF \uparrow MVO2 \uparrow$

# 心臓と後負荷の相互作用、前負荷 $V_{ed}$



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

$$= \frac{E_{es}}{E_{es} + \frac{R}{T}} (V_{ed} - V_0)$$

$$E_a = \frac{R}{T} = HR \cdot R^*$$

$$CO = SV \cdot HR$$

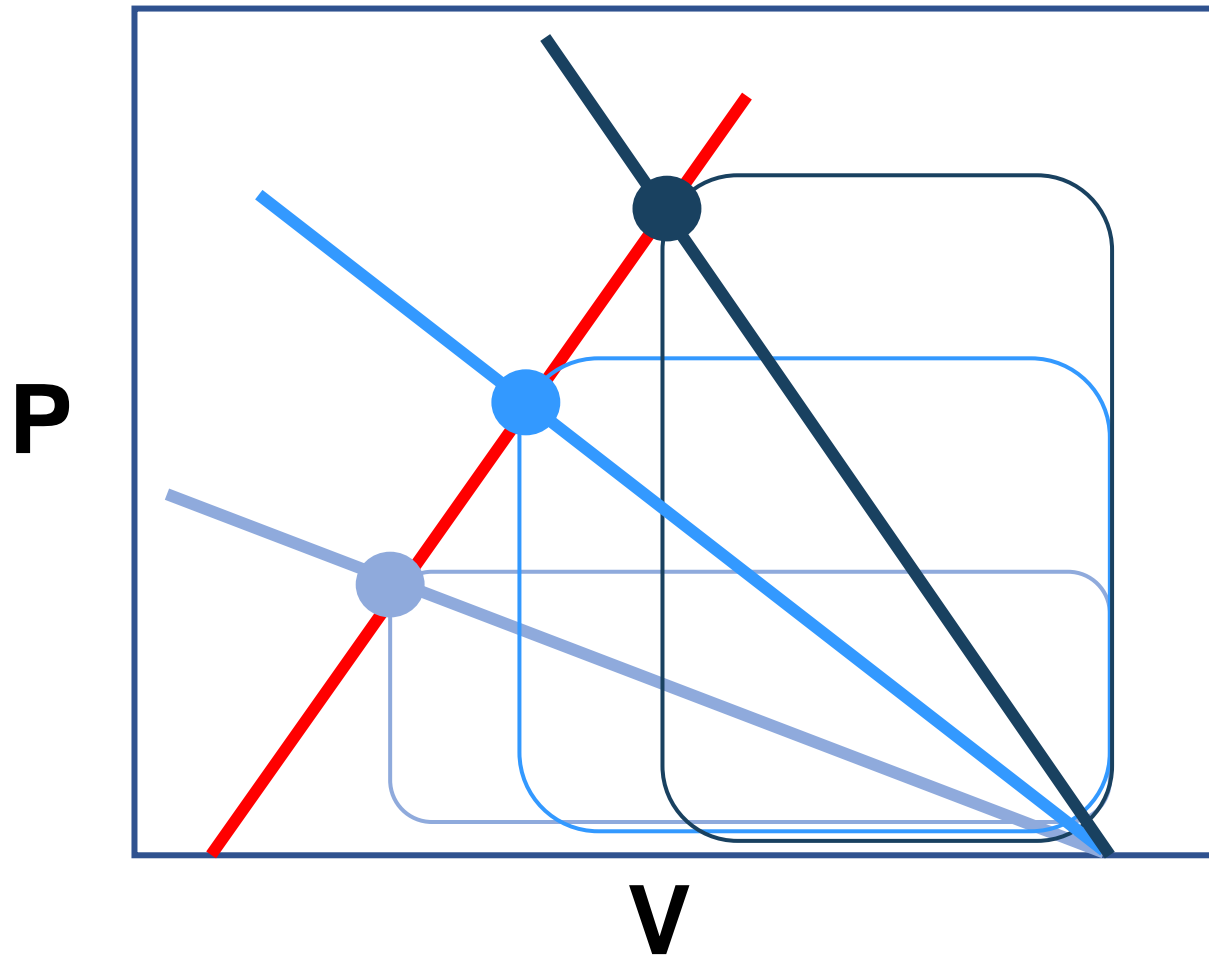
$$EF = \frac{SV}{V_{ed}} \approx \frac{E_{es}}{E_{es} + E_a} = \frac{E_{es}}{E_{es} + HR \cdot R^*}$$

R=mmHg/ml/s, R\*=mmHg/ml/m

$V_{ed}$  増加

$E_a \rightarrow SV \uparrow CO \uparrow BP \uparrow EF \rightarrow MVO_2 \uparrow$

# 心臓と後負荷の相互作用、血管抵抗 R



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

$$= \frac{E_{es}}{E_{es} + \frac{R}{T}} (V_{ed} - V_0)$$

$$E_a = \frac{R}{T} = HR \cdot R^*$$

$$CO = SV \cdot HR$$

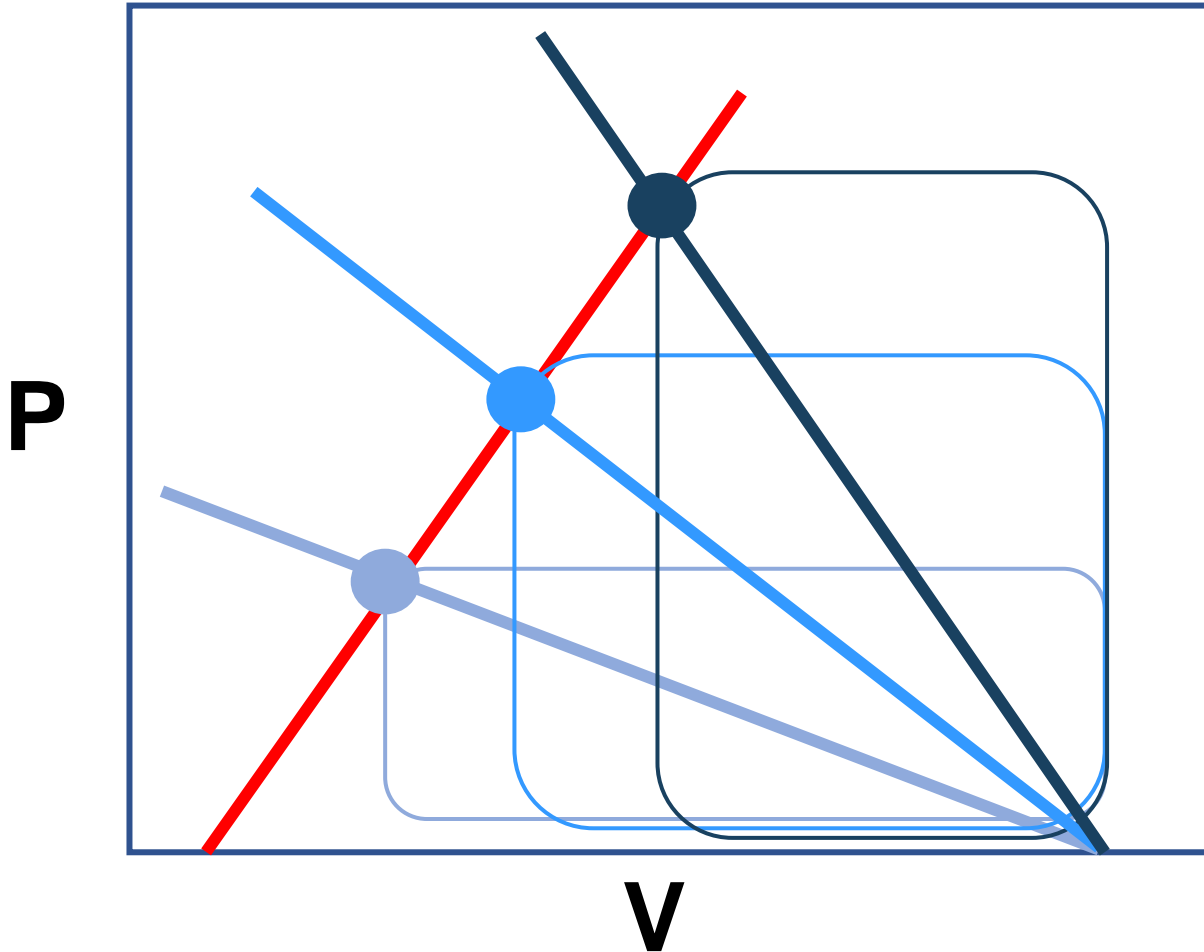
$$EF = \frac{SV}{V_{ed}} \approx \frac{E_{es}}{E_{es} + E_a} = \frac{E_{es}}{E_{es} + HR \cdot R^*}$$

R=mmHg/ml/s, R\*=mmHg/ml/m

血管抵抗R 増加

$E_a \uparrow$   $SV \downarrow$   $CO \downarrow$   $BP \uparrow$   $EF \downarrow$   $MVO2 \uparrow$

# 心臓と後負荷の相互作用、心拍数 HR



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

$$= \frac{E_{es}}{E_{es} + \frac{R}{T}} (V_{ed} - V_0)$$

$$E_a = \frac{R}{T} = HR \cdot R^*$$

$$CO = SV \cdot HR$$

$$EF = \frac{SV}{V_{ed}} \approx \frac{E_{es}}{E_{es} + E_a} = \frac{E_{es}}{E_{es} + HR \cdot R^*}$$

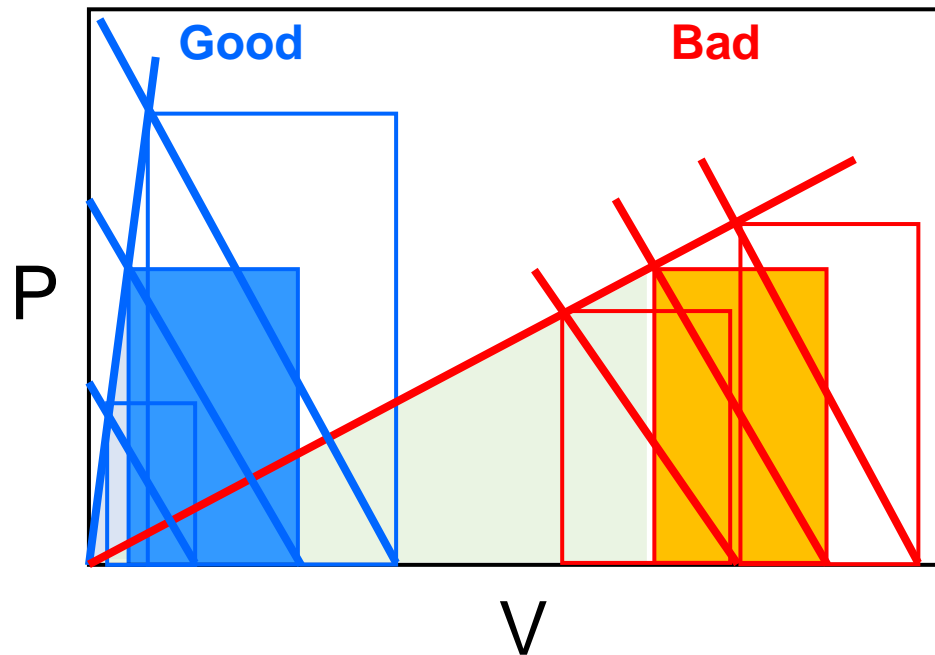
R=mmHg/ml/s, R\*=mmHg/ml/m

HR 増加

$E_a \uparrow$   $SV \downarrow$   $CO \uparrow$   $BP \uparrow$   $EF \downarrow$   $MVO_2 \uparrow$

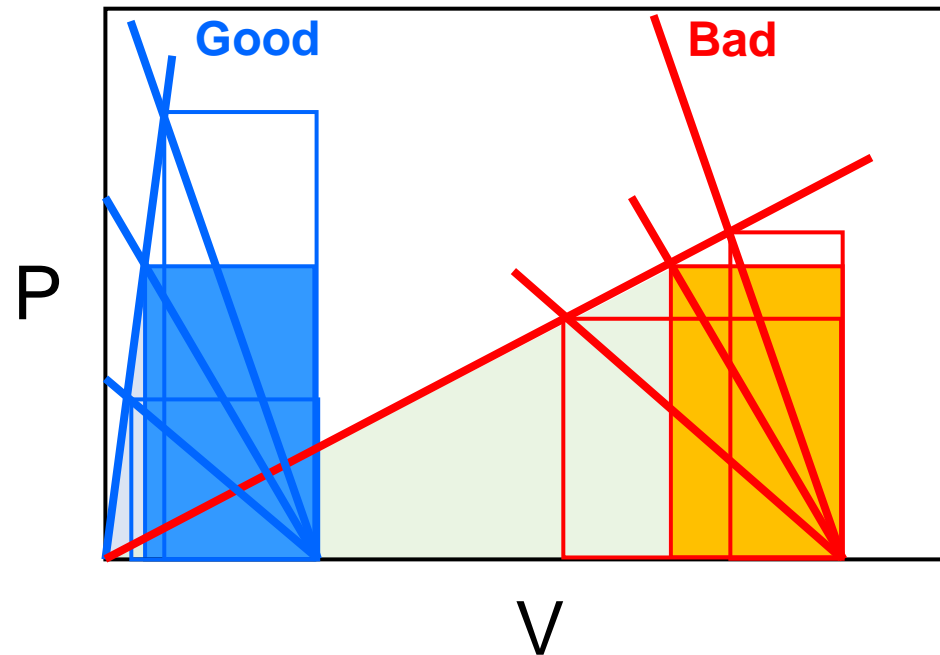
# 良い心臓と悪い心臓の負荷依存の違い

## 前負荷



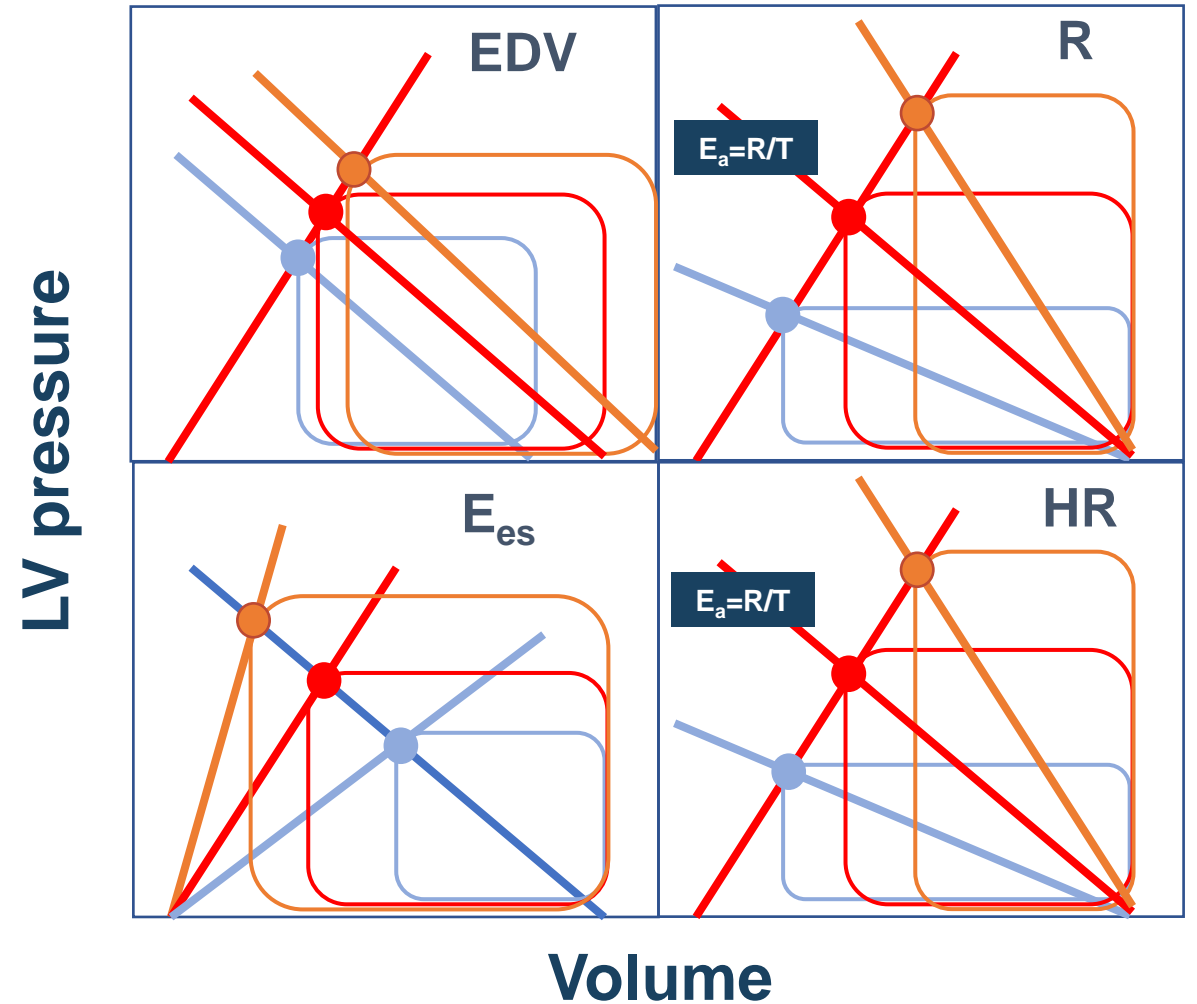
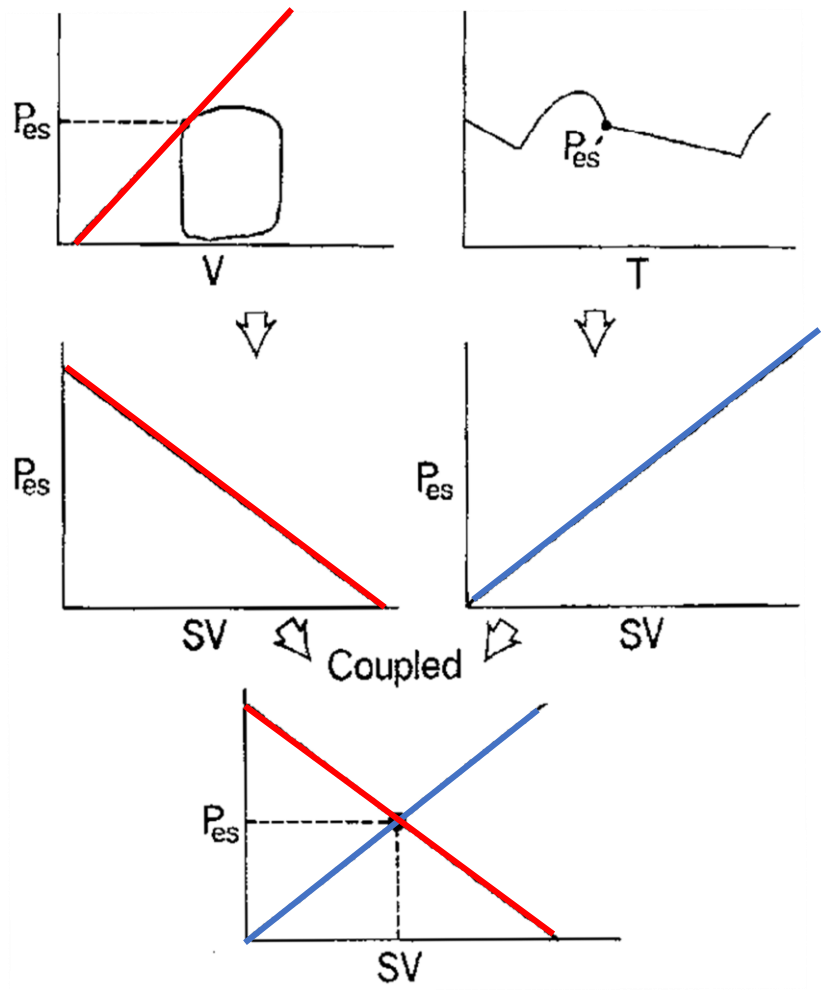
- SVは前負荷依存
- SVは後負荷低依存
- エネルギー効率が良い

## 後負荷



- SVは後負荷依存
- SVは前負荷低依存
- エネルギー効率が悪い

# 心臓と後負荷の相互作用の纏め



# $E_a$ による心室動脈結合の強みと限界

## 強み

- 任意の心室エラストランス $E_{es}$ 、 $R$ 、 $HR$ 、 $EDV$ に対する $SV$ 、 $CO$ 、 $EF$ が推定ができる
- 上記の条件において圧容積面積 $PVA$ から代謝( $MVO_2$ )が推定できる
- 前負荷 ( $EDV$ )- $CO$ 関係、スターリングの法則の記述可能
- 血行動態の全貌が $PV$  loopに可視化され、診断や治療戦略の選択に貢献

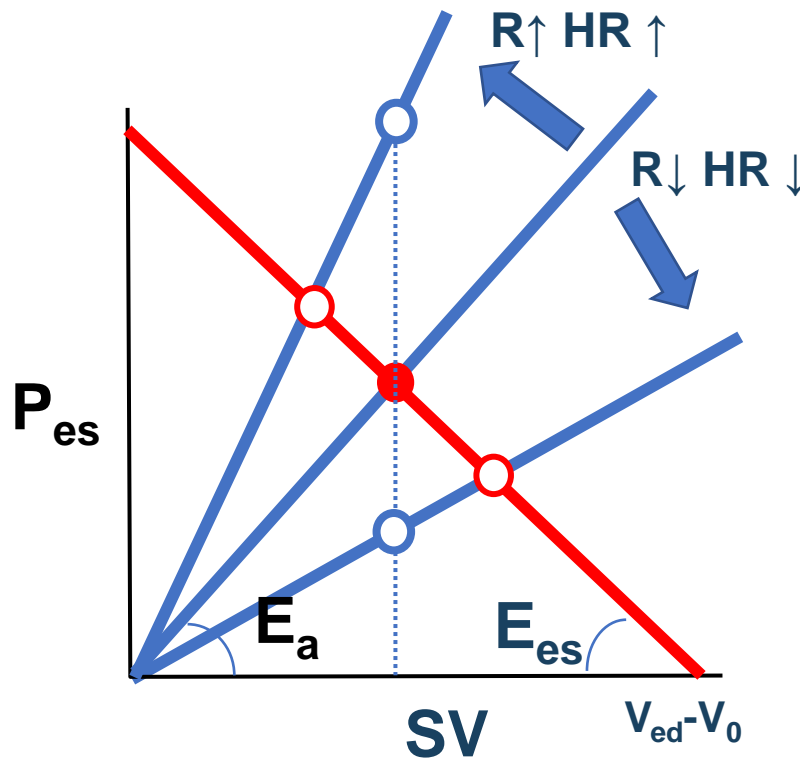
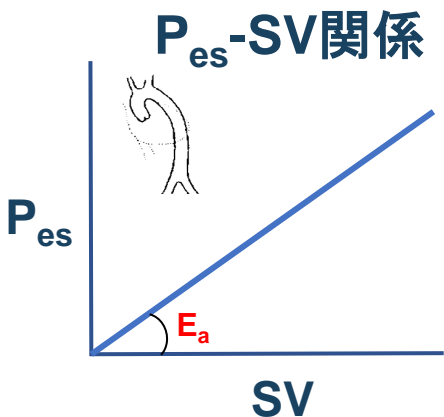
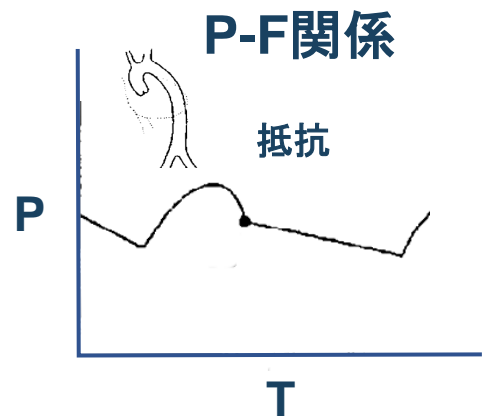
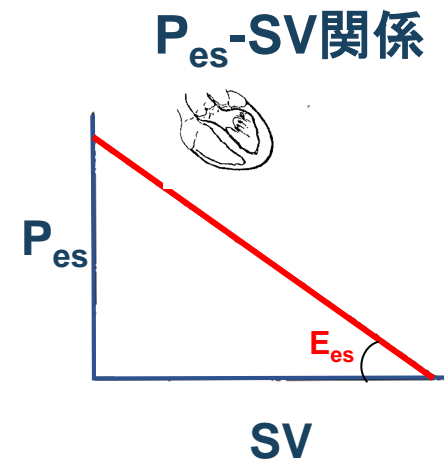
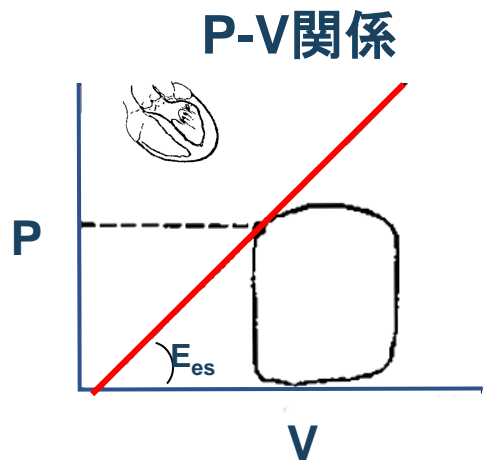
## 限界

- 圧容積関係は推定できるが、血圧や血流波形の推定はできない（脈圧、反射波）
- 極端な徐脈や $C$ が極端に小さくなると $P_{es} \approx P_m$ 精度が下がり、血行動態の推定精度が下がる（ $SV$ の過大評価）
- 心室と血管結合の枠組みだけでは前負荷が決まらない。そのためには**静脈還流と循環平衡の概念が必須**。



# 今日の1枚: 動脈のエラスタンス化

## 実効エラスタンスの性質



$E_a$ 誕生!!!

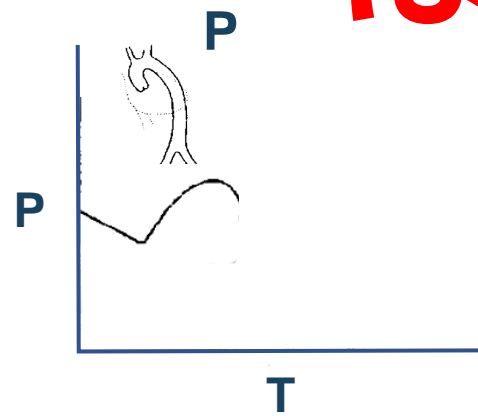
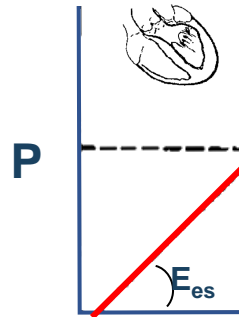


# 今日の1枚: 動脈のエラスタンス化

## 実効エラスタンスの性質

P-V関係

$P_{es}$ -SV関係



この図が理解できれば他の話は忘れても

OK



$E_a$ 誕生!!!

