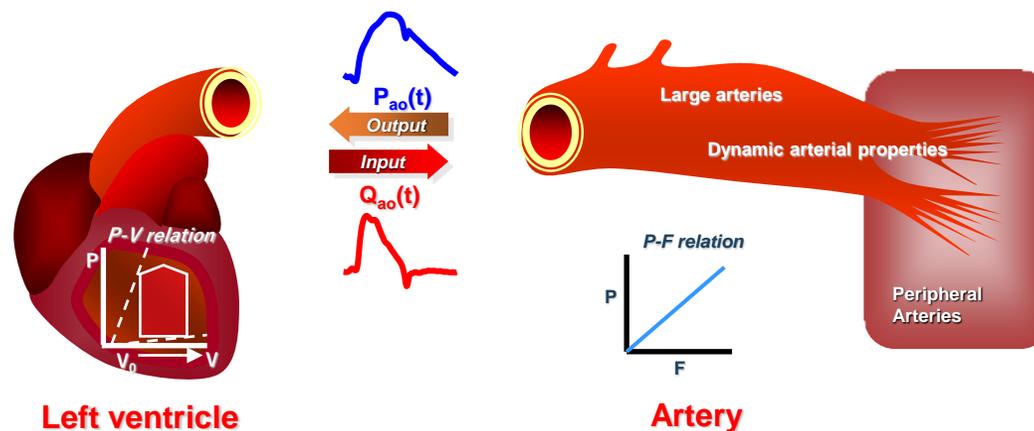


後負荷を識る、使う、超える

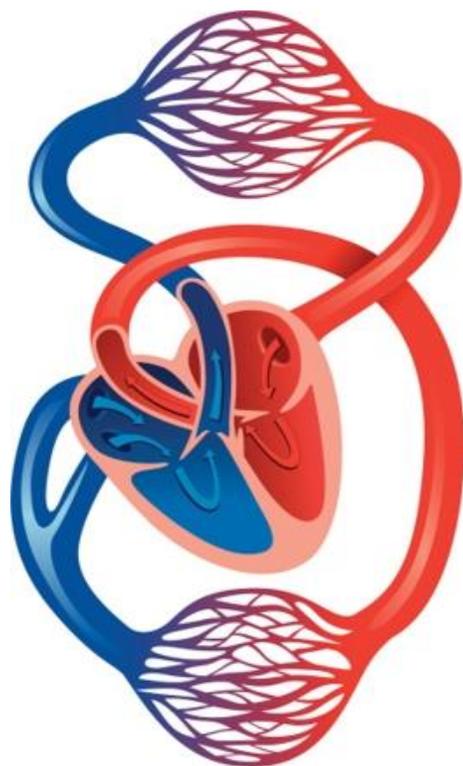
大胆な単純化で見えてくる異次元の世界



循環制御システム研究機構

砂川賢二

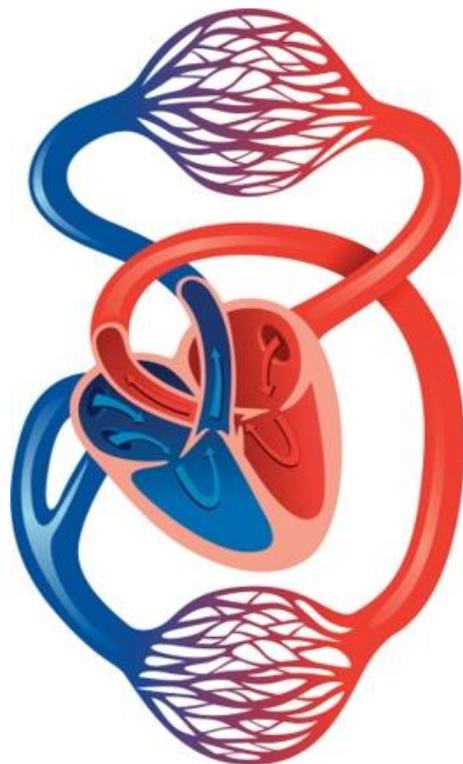
後負荷を語る前に循環器系の設計目標の確認



- 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



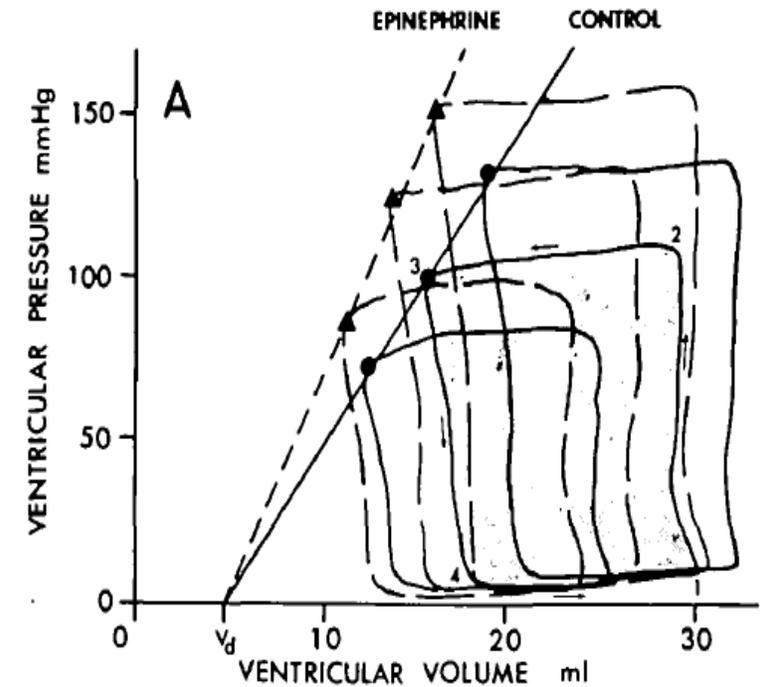
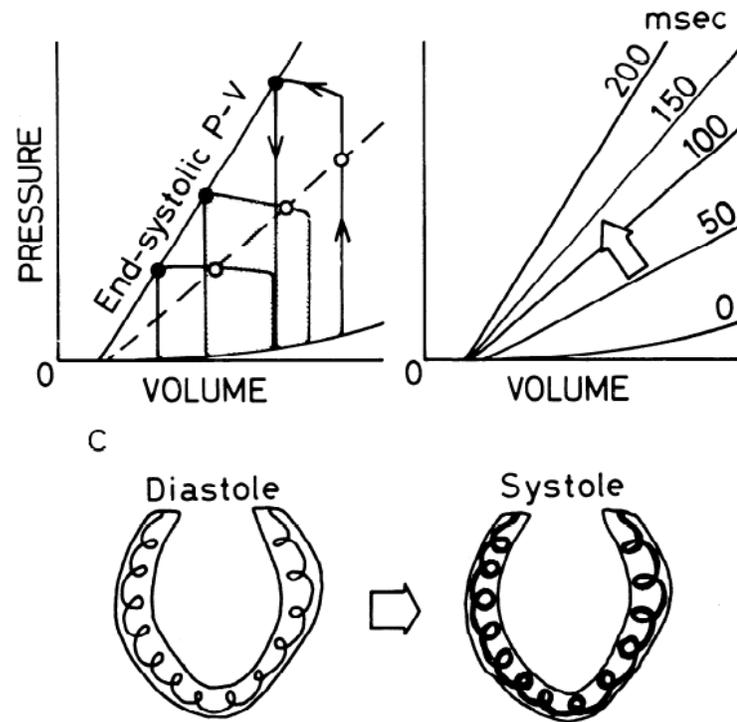
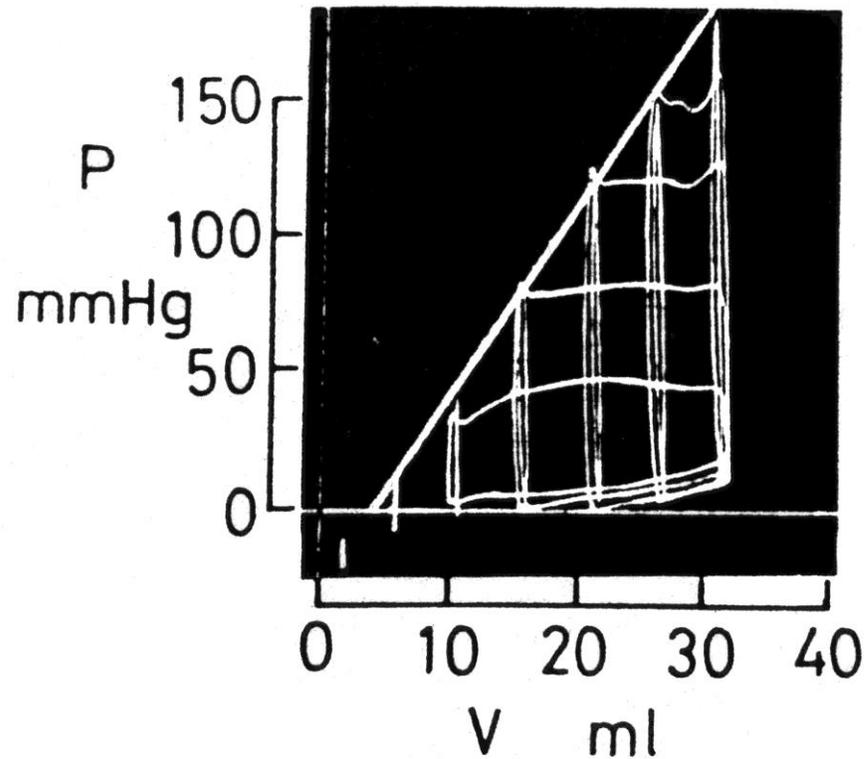
- 血行動態 (SV、CO、AP、EF) や代謝 (MVO₂) の理解が出来る—**理解・診断を助ける後負荷指標**
- 介入に対して血行動態の応答が予測ができる—**治療に貢献する後負荷指標**

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

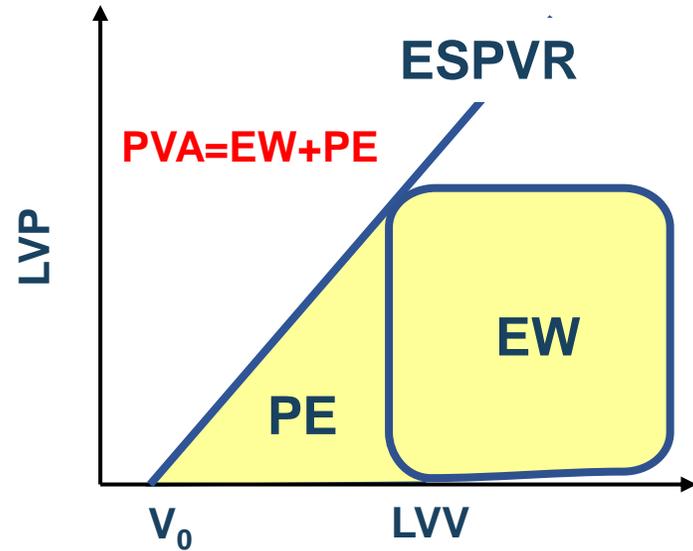
ESPVRは収縮性の指標



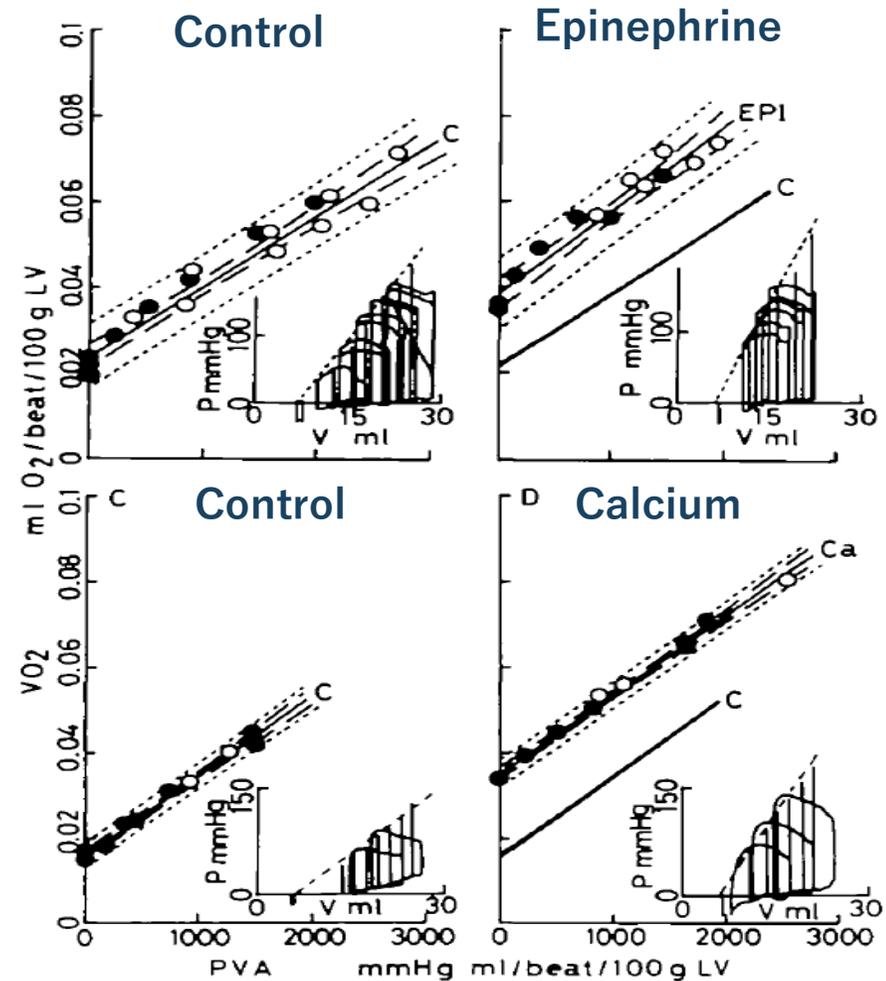
Suga H et al. Am J Physiol 1979

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

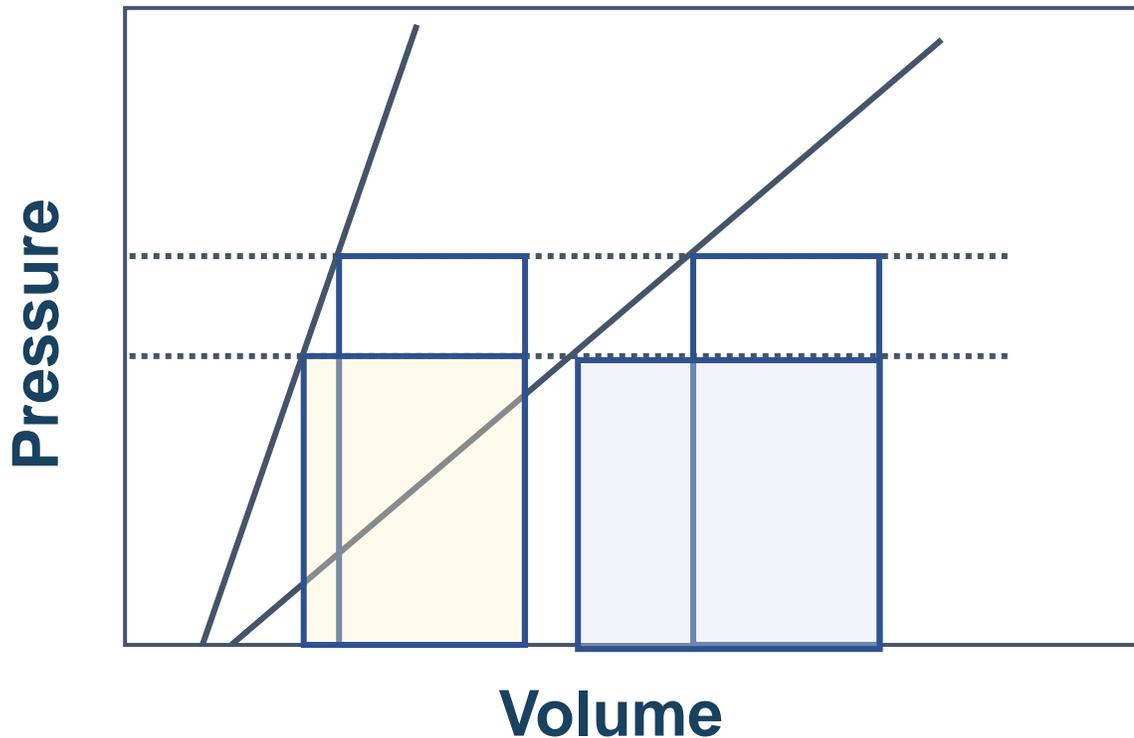


- 圧容積面積 Pressure-volume area (PVA) は心室酸素消費量 MVO_2/beat に比例する (代謝の窓)
- 収縮性の増加はPVA非依存の MVO_2 を増やす
- $VO_2/\text{beat} = A \cdot PVA + B \cdot E_{es} + C$
- $VO_2/\text{min} = (A \cdot PVA + B \cdot E_{es} + C) \cdot HR$



Suga H et al, Circ Res 1983

候補 1: 血圧

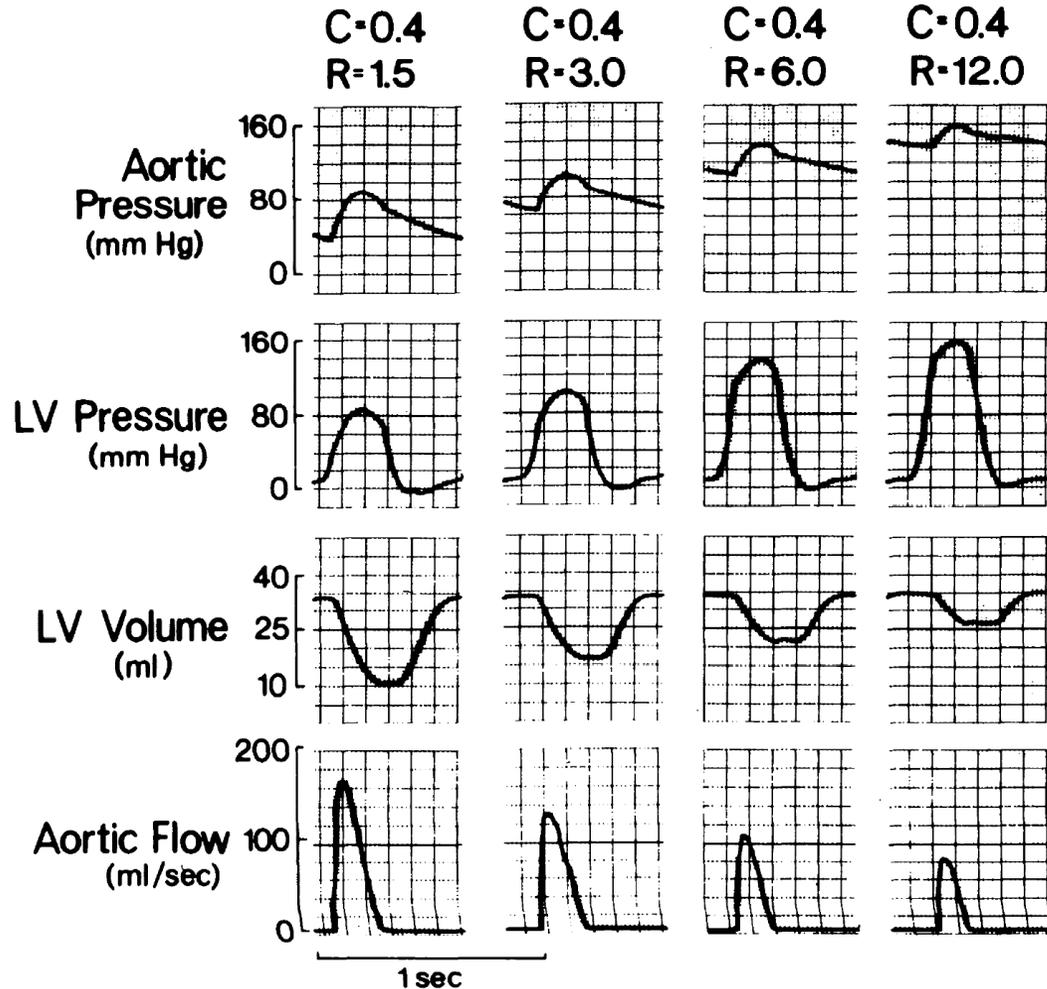


強みと弱み

- 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

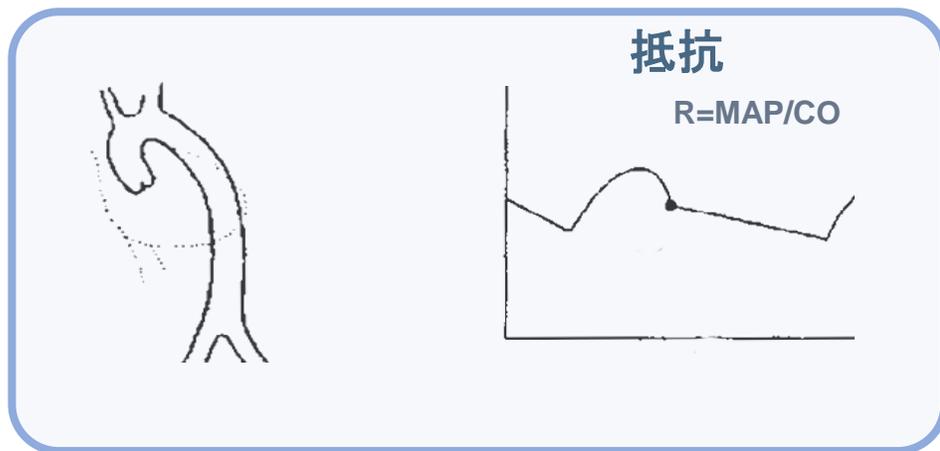
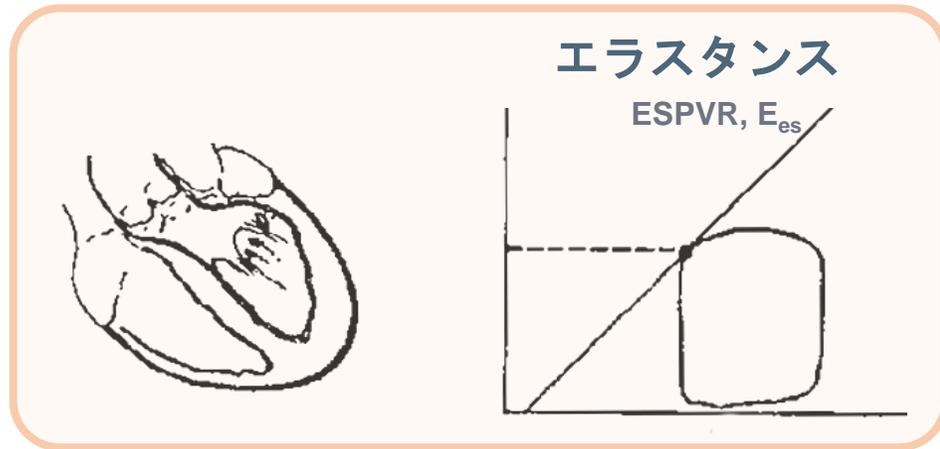
候補 2: 血管抵抗

強みと弱み

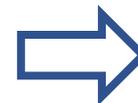


- 動脈の機械特性を反映
- 血行動態 (SV、CO、AP、EF) や代謝 (MVO₂) を定性的に理解できる。診断的な価値は限定的。
- 定量的に血行動態やMVO₂を理解することは困難
- 治療介入に対する血行動態やMVO₂の応答の予測は困難

候補 3: 実効動脈エラスタンス E_a

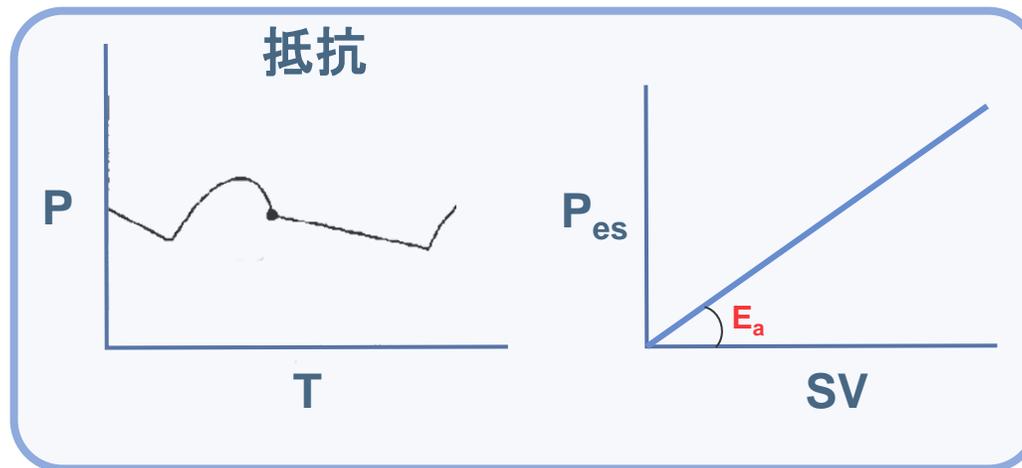
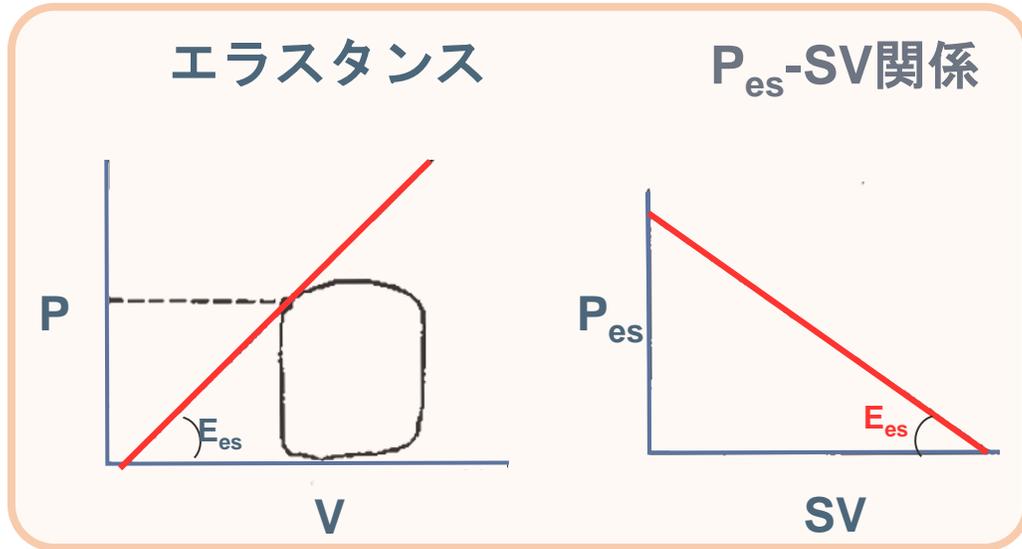


相互作用

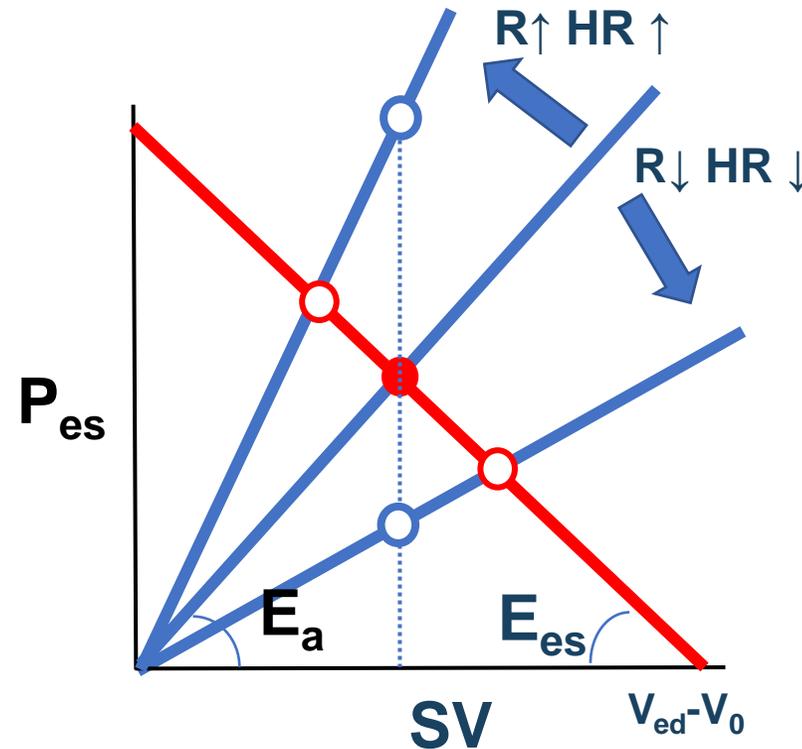


残念。次元が異なり血行動態の予測ができない。

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



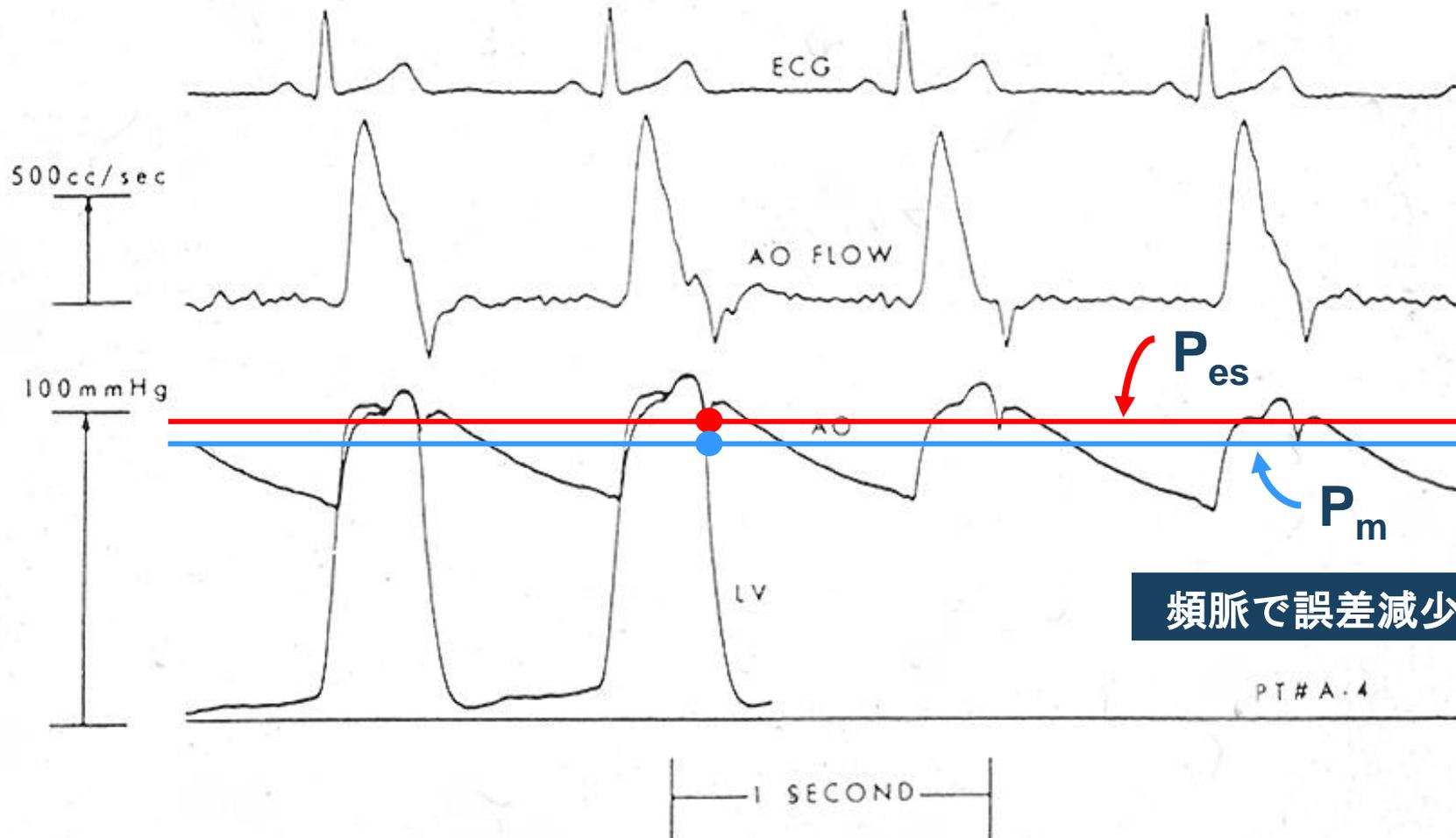
E_a 誕生!!!



R、HRと E_a の定量的関係は？

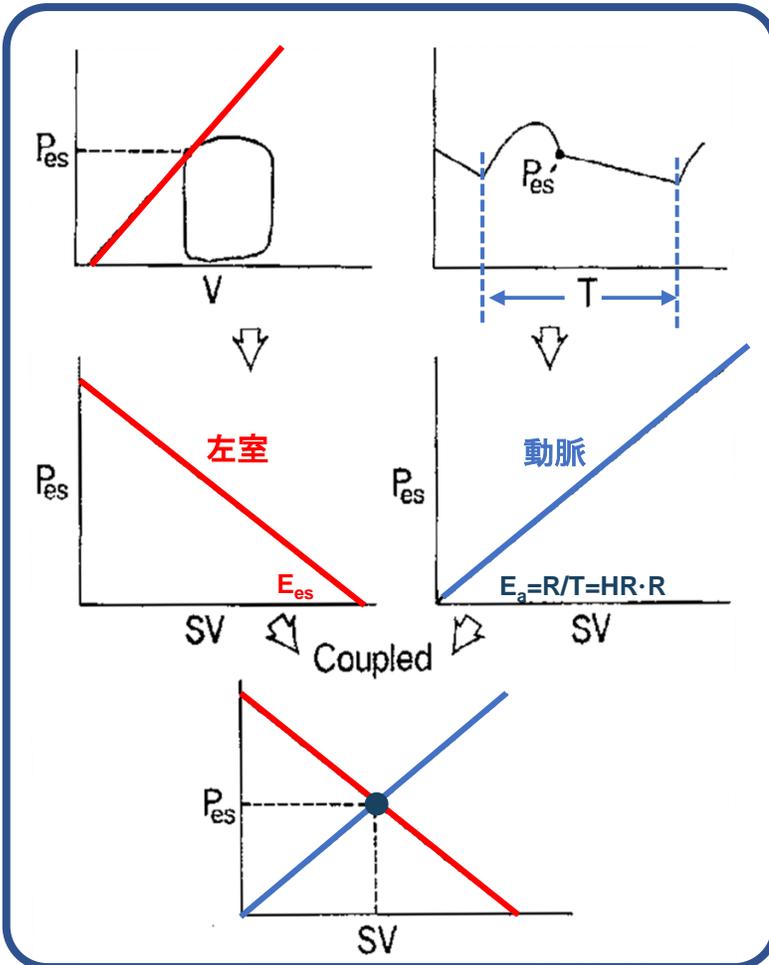
実効動脈エラスタンス E_a に定量性の導入

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

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

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

$$P_{es} \approx P_m$$

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

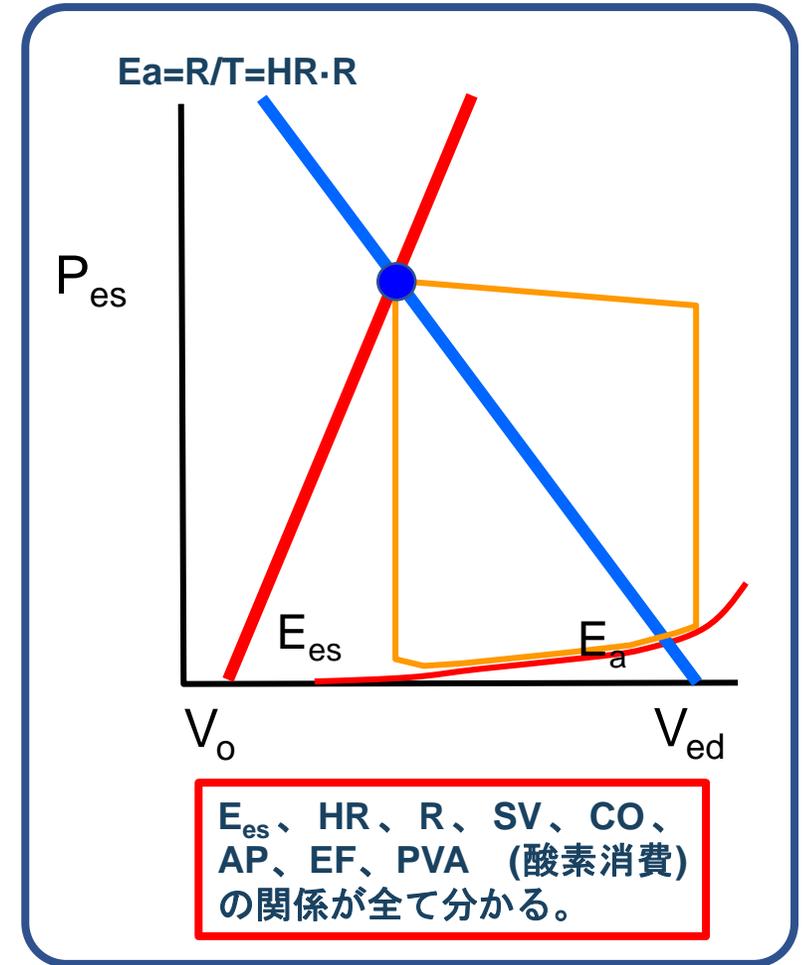
$$= \frac{R}{T} SV = HR \cdot R \cdot SV$$

$$= E_a SV$$

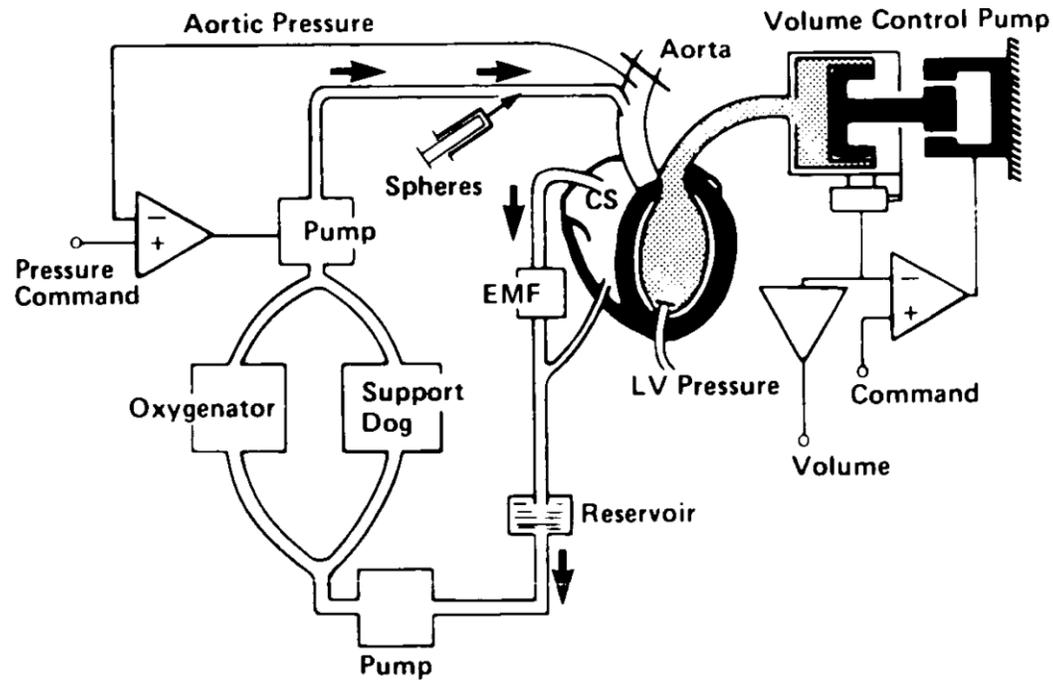
$$SV = \frac{E_{es}}{E_{es} + E_a} (V_{ed} - V_0)$$

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

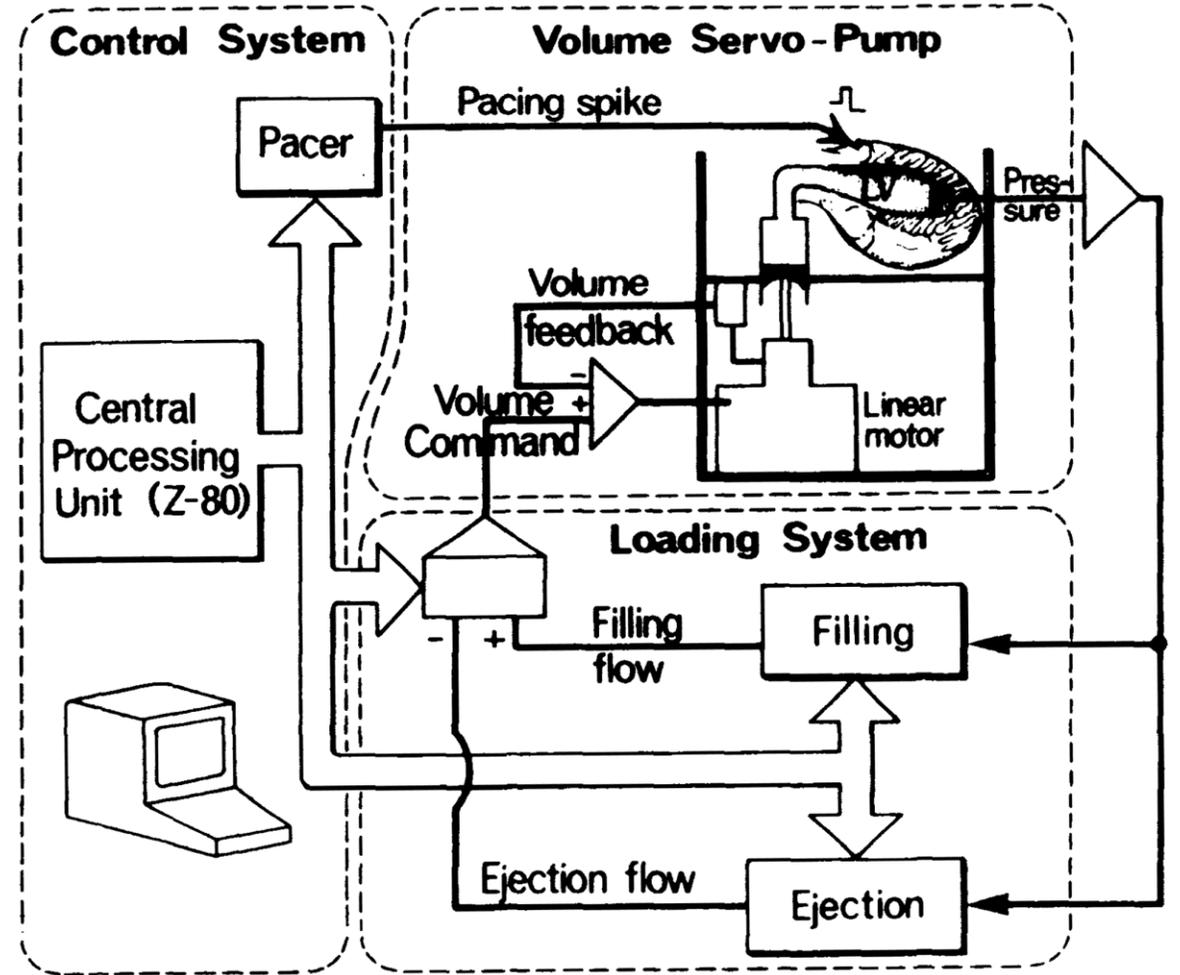
作図解



精度検証に不可欠な高精度心室負荷装置

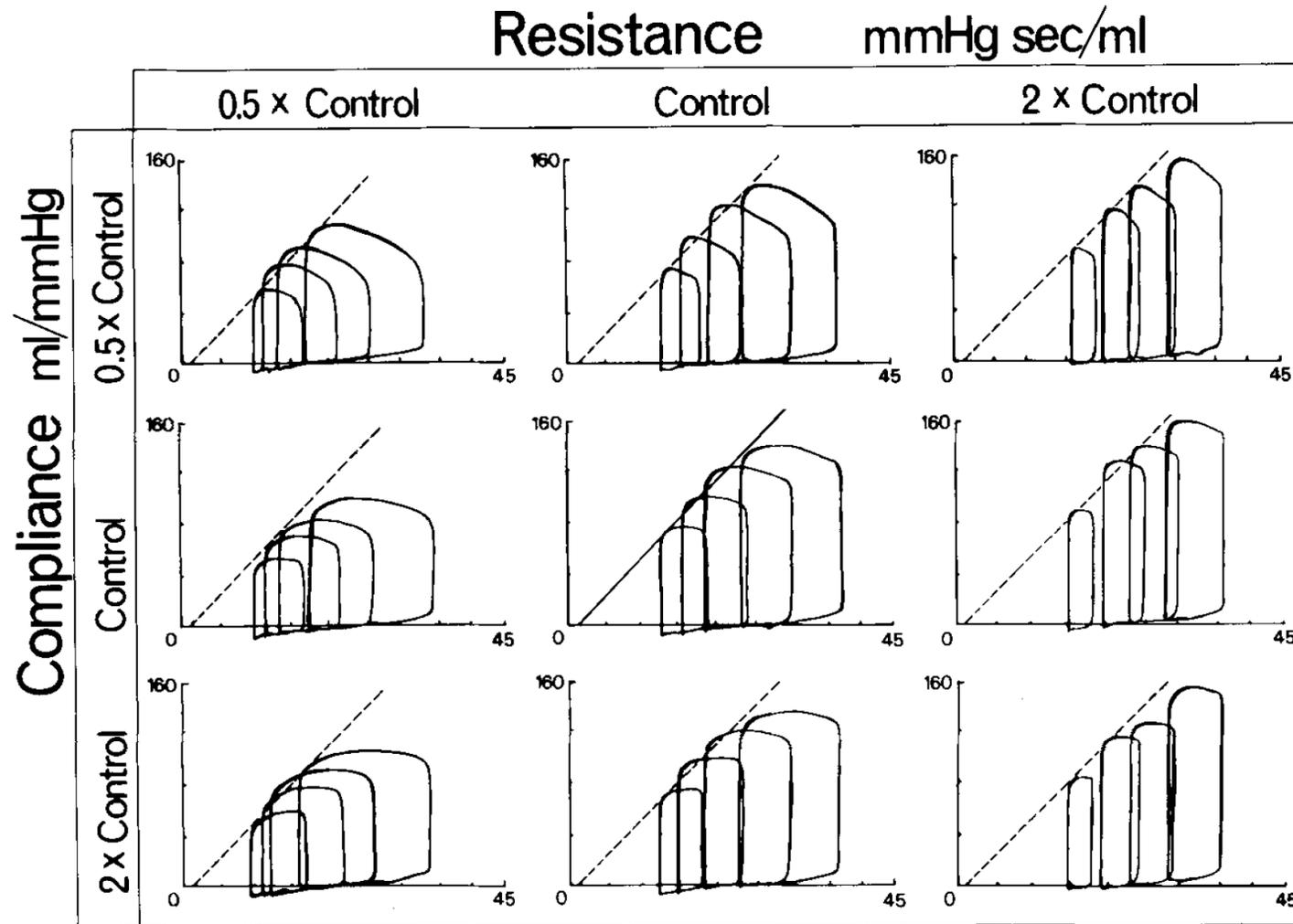


Sunagawa K et al., Circ Res 1983



Sunagawa K, Am J Physiol 1982

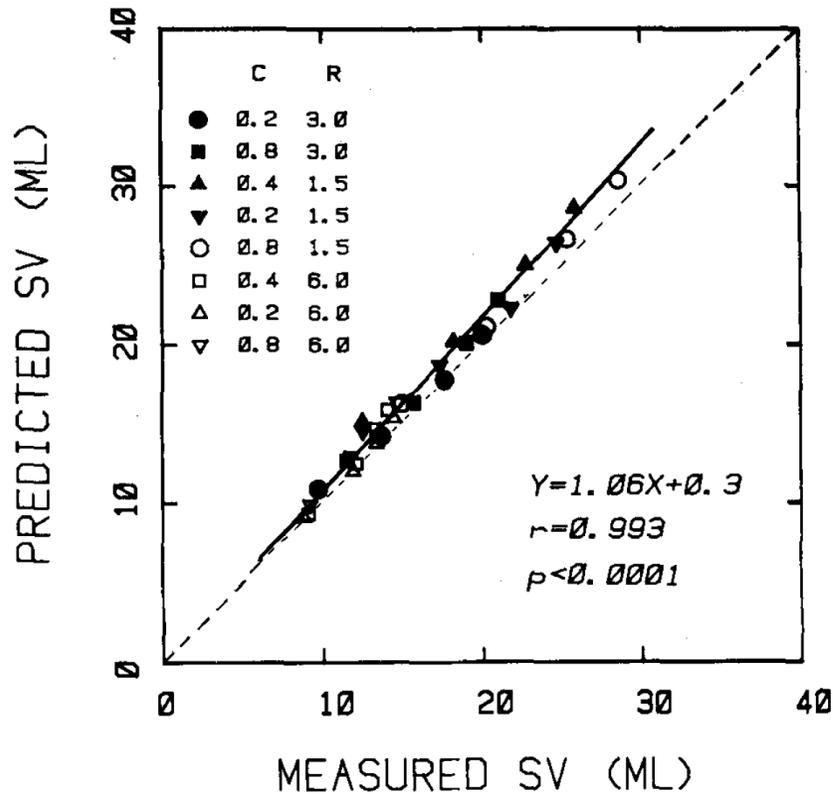
再現された Pressure-volume loops



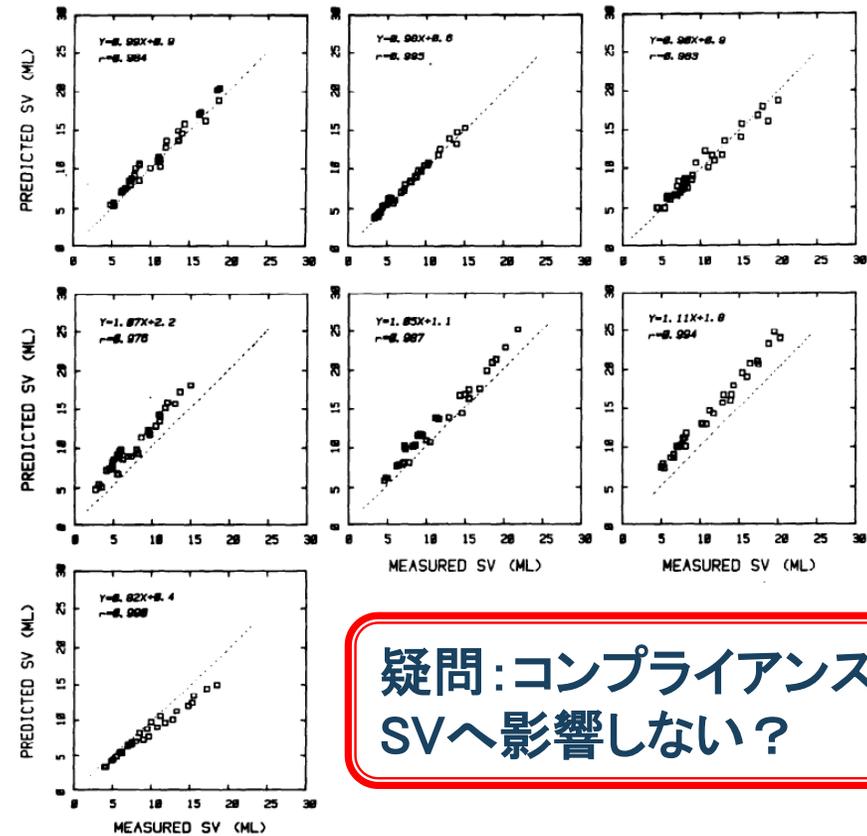
Maughan WL, Circulation 1985

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



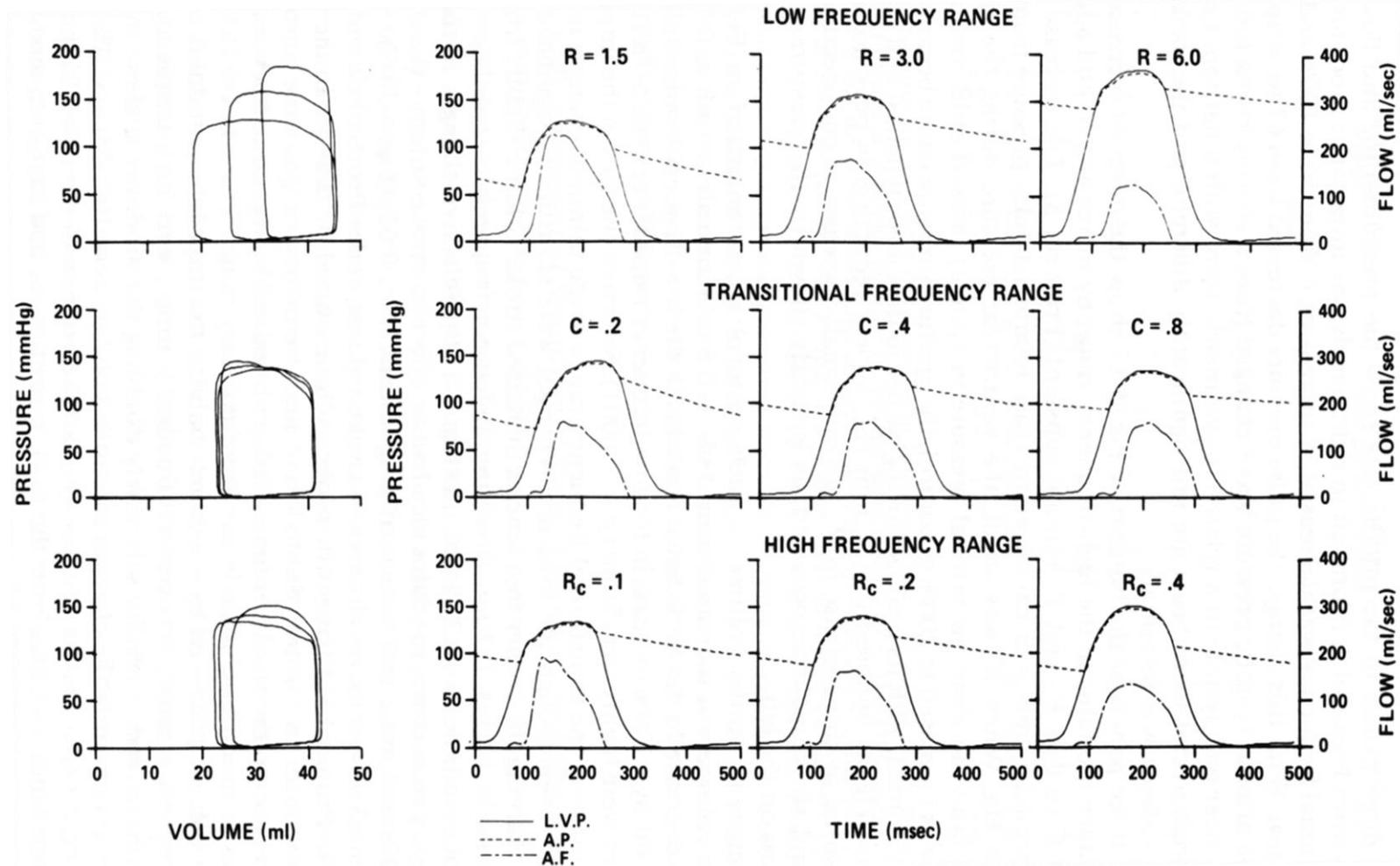
Maughan WL, Circulation 1985



疑問:コンプライアンスはSVへ影響しない?

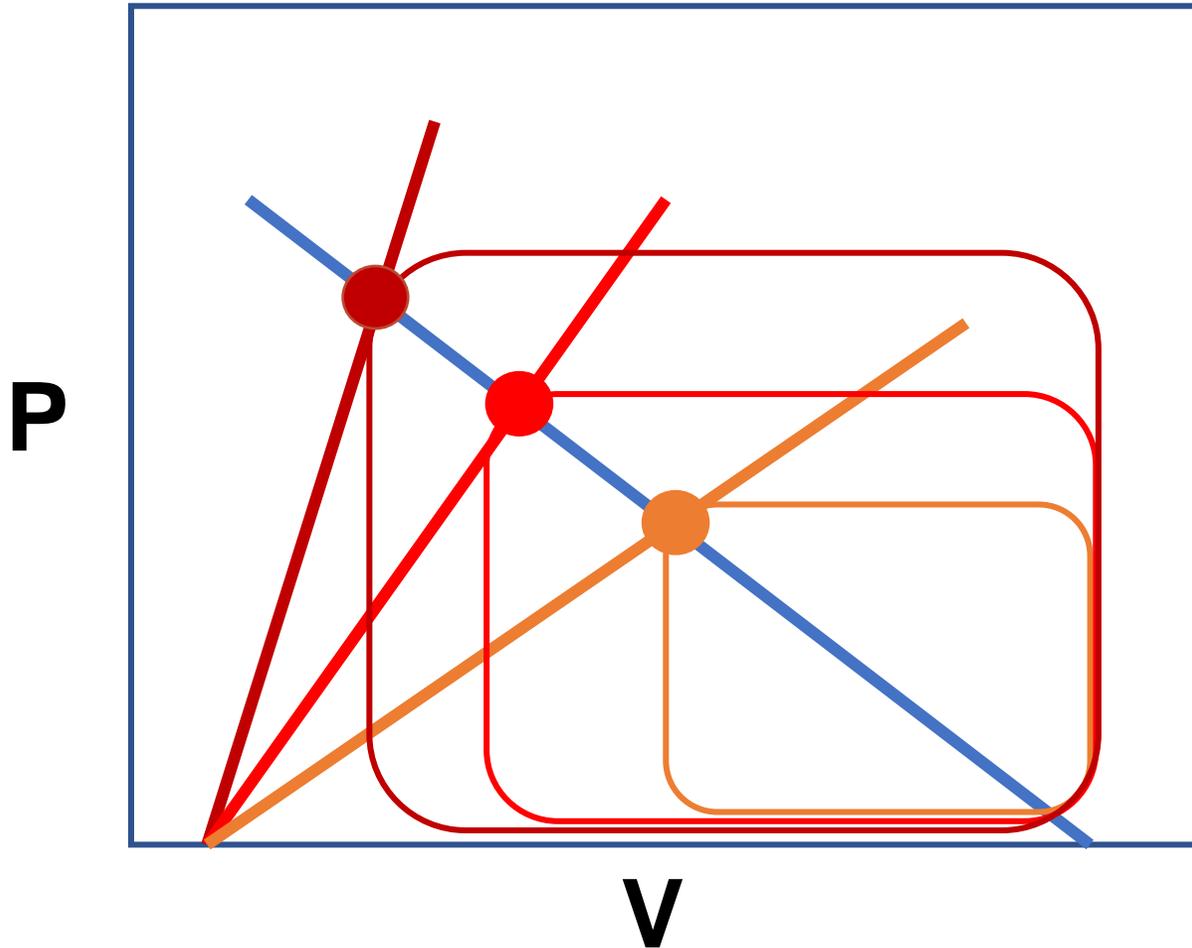
Sunagawa K et al., Am J Physiol 1983

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}



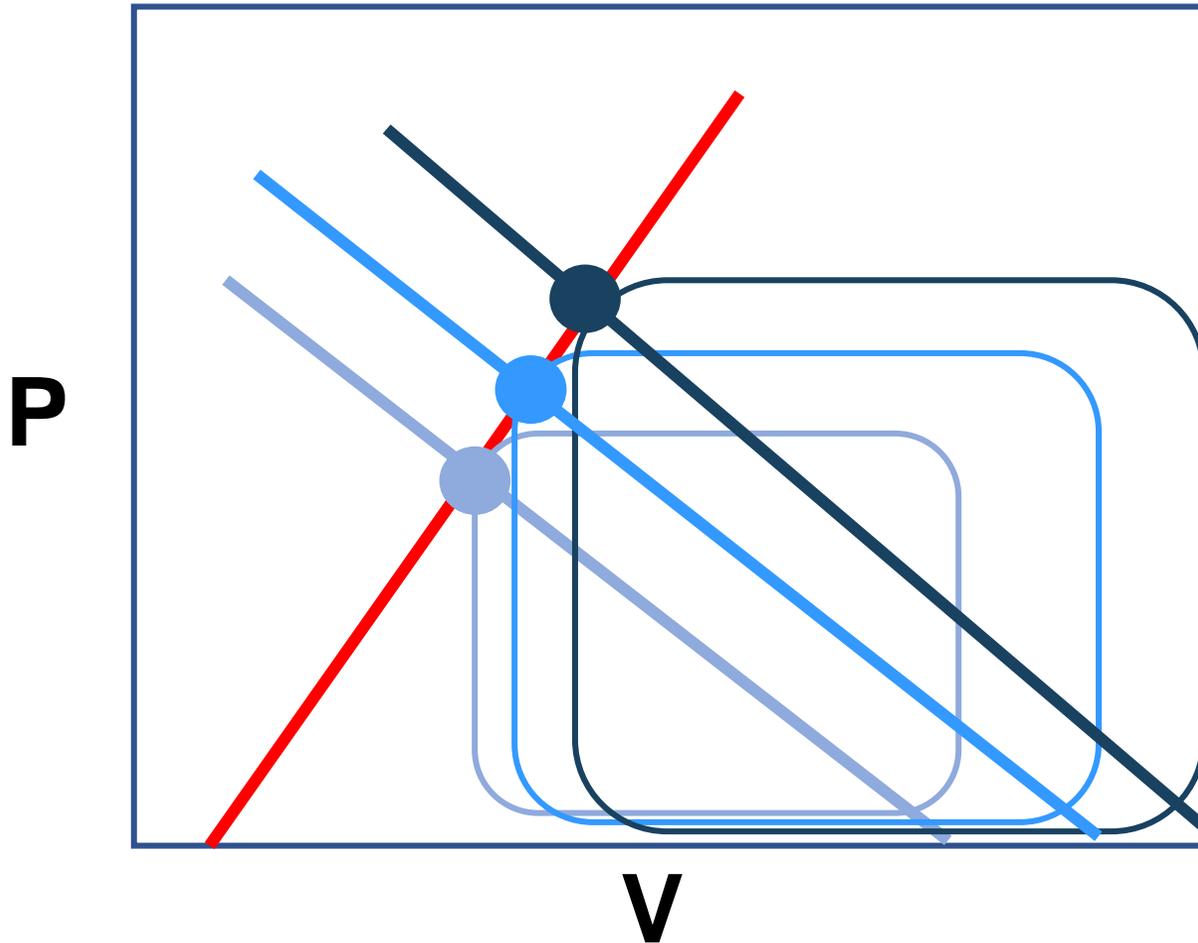
$$\begin{aligned}
 SV &= \frac{E_{es}}{E_{es} + E_a} (V_{ed} - V_0) \\
 &= \frac{E_{es}}{E_{es} + \frac{R}{T}} (V_{ed} - V_0) \\
 E_a &= \frac{R}{T} = HR \cdot R^* \\
 CO &= SV \cdot HR \\
 EF &= \frac{SV}{V_{ed}} \approx \frac{E_{es}}{E_{es} + E_a} = \frac{E_{es}}{E_{es} + HR \cdot R^*}
 \end{aligned}$$

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

収縮性 E_{es} 増加

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

心臓と後負荷の相互作用、前負荷 V_{ed}



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

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

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

$$CO = SV \cdot HR$$

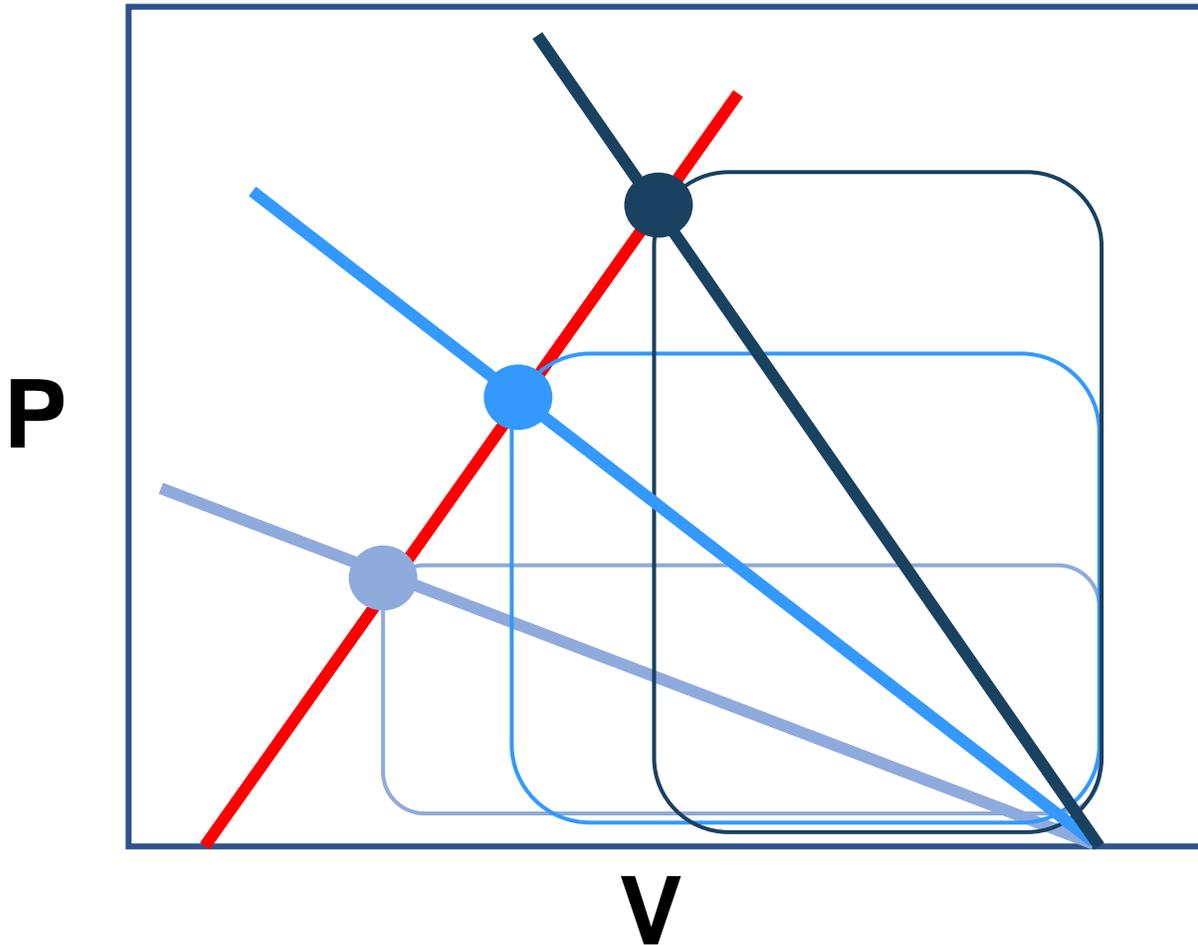
$$EF = \frac{SV}{V_{ed}} \approx \frac{E_{es}}{E_{es} + E_a} = \frac{E_{es}}{E_{es} + HR \cdot R^*}$$

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



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

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

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

$$CO = SV \cdot HR$$

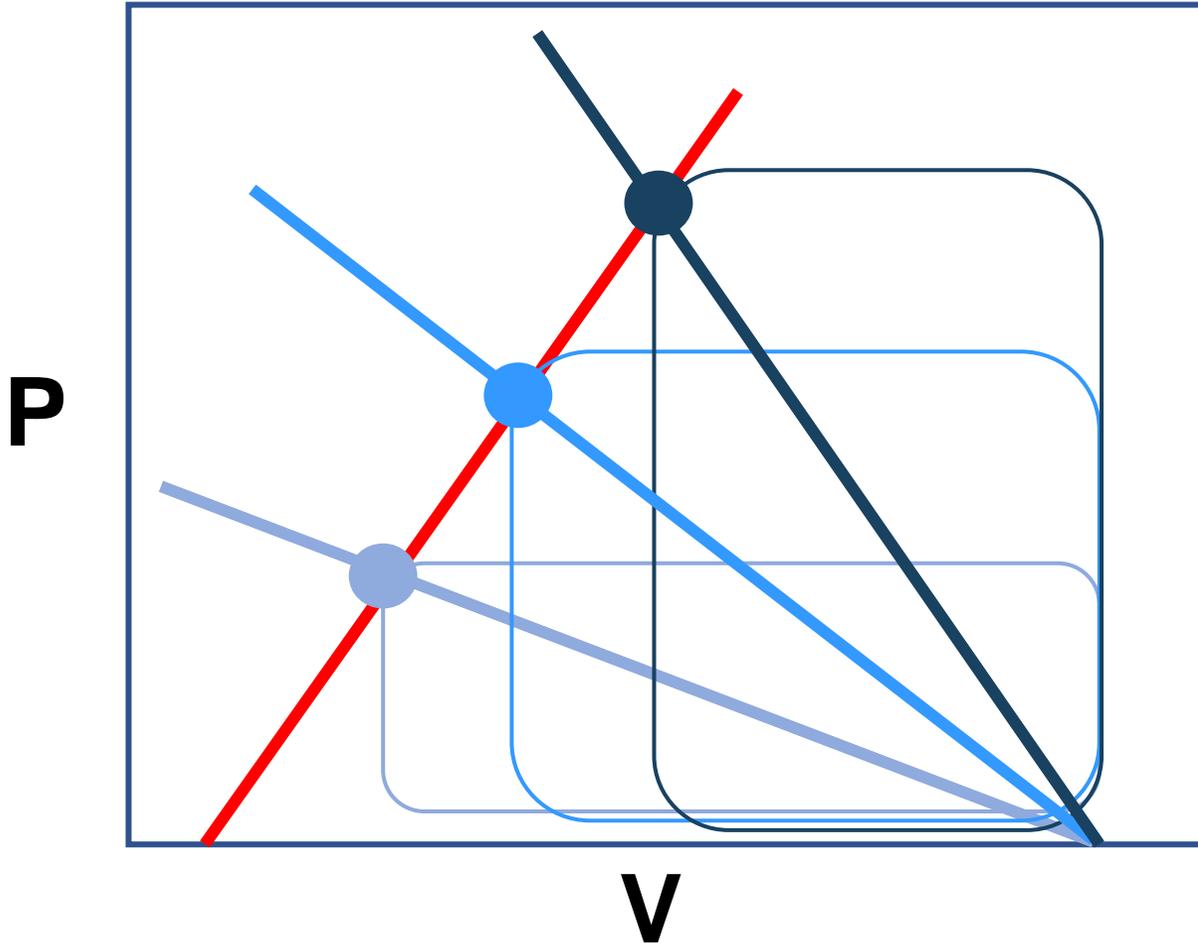
$$EF = \frac{SV}{V_{ed}} \approx \frac{E_{es}}{E_{es} + E_a} = \frac{E_{es}}{E_{es} + HR \cdot R^*}$$

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



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

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

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

$$CO = SV \cdot HR$$

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

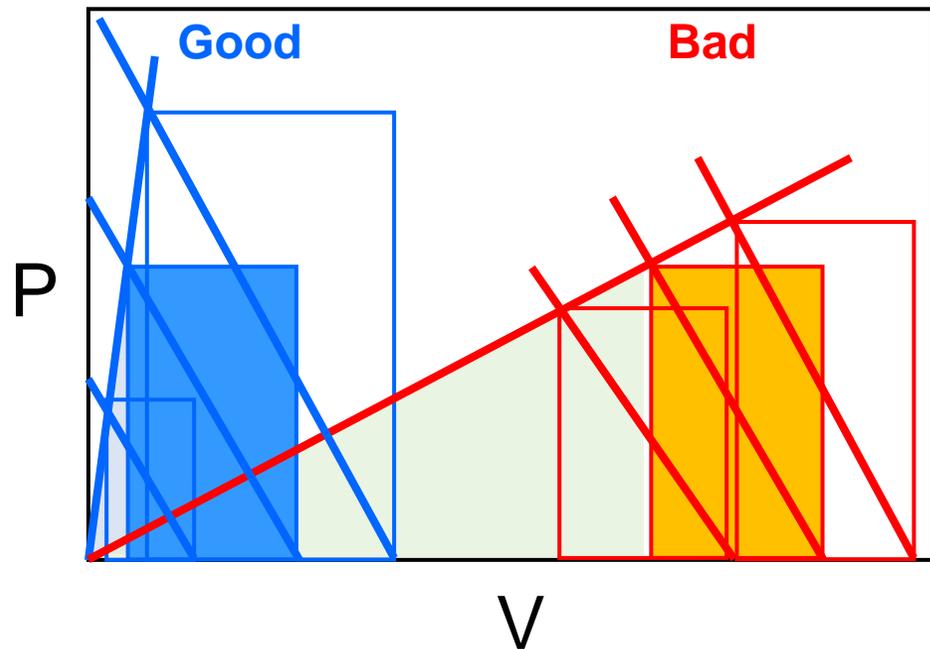
R=mmHg/ml/s, R*=mmHg/ml/m

HR 増加

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

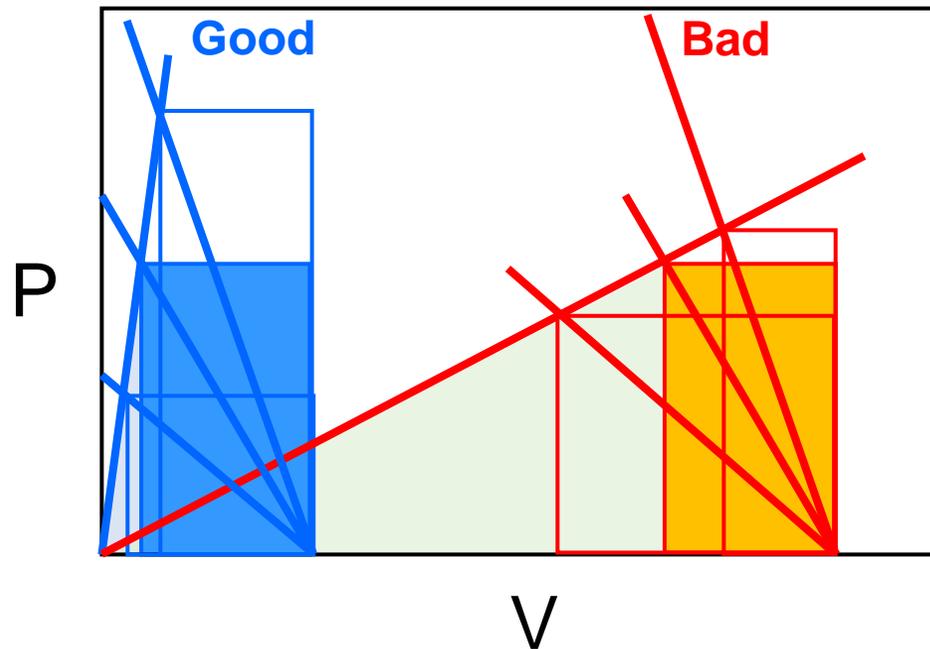
良い心臓と悪い心臓の負荷依存の違い

前負荷



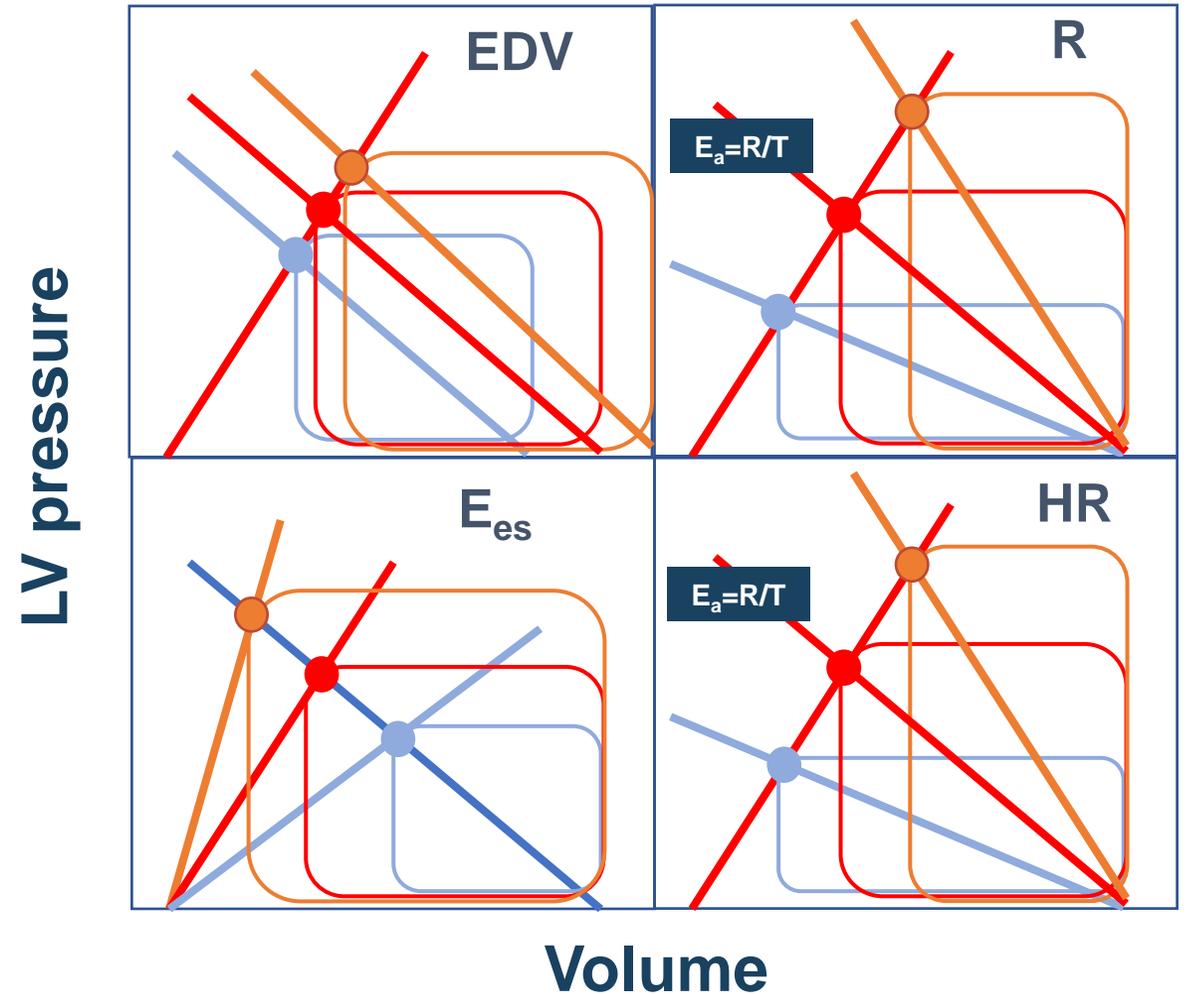
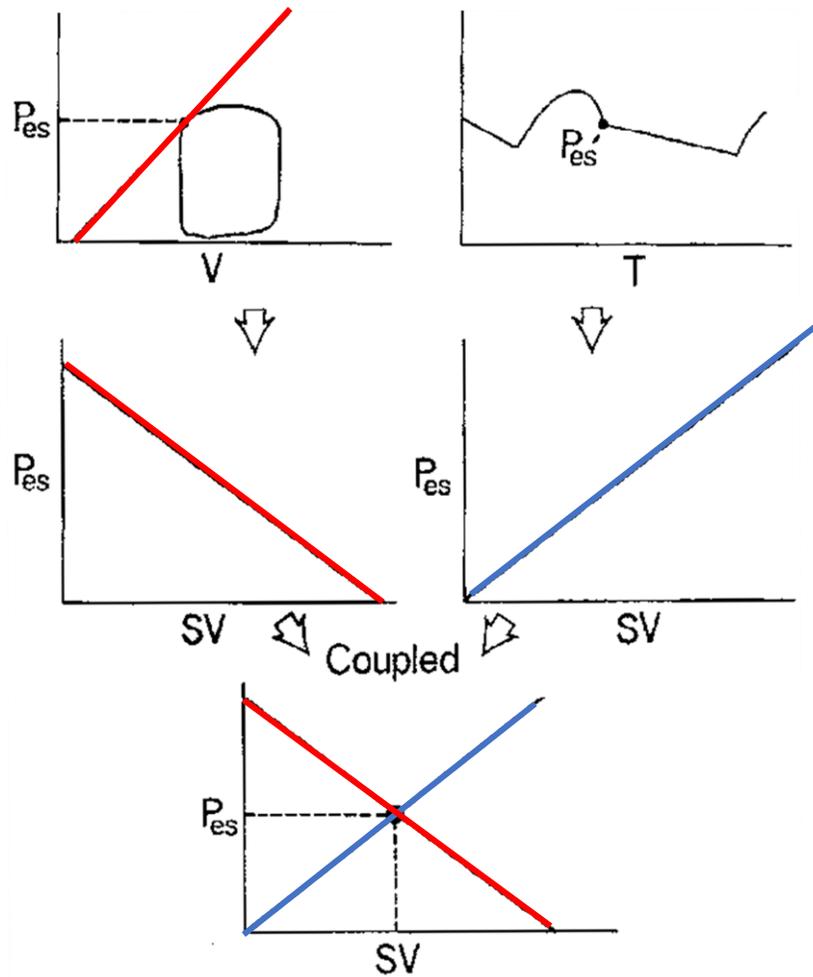
- SVは前負荷依存
- SVは後負荷低依存
- エネルギー効率が良い

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

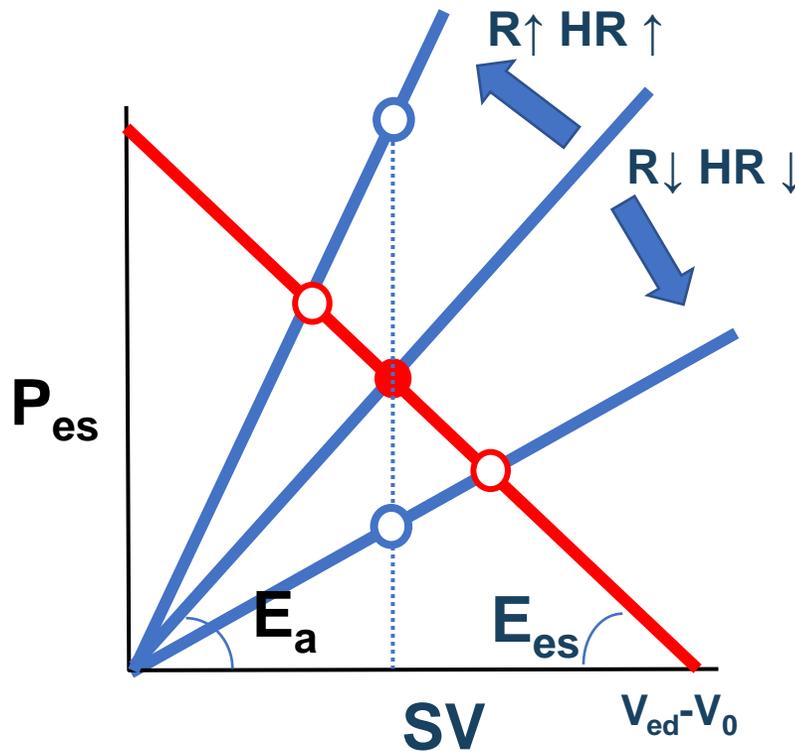
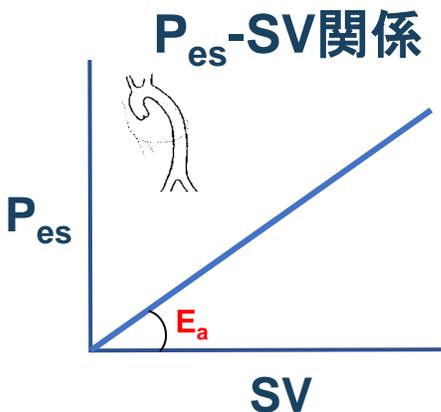
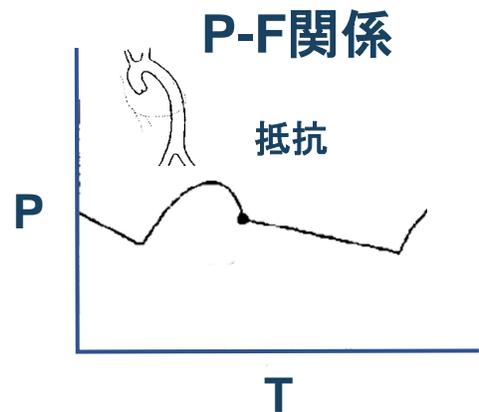
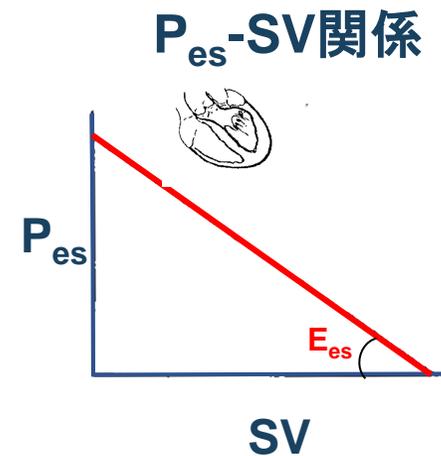
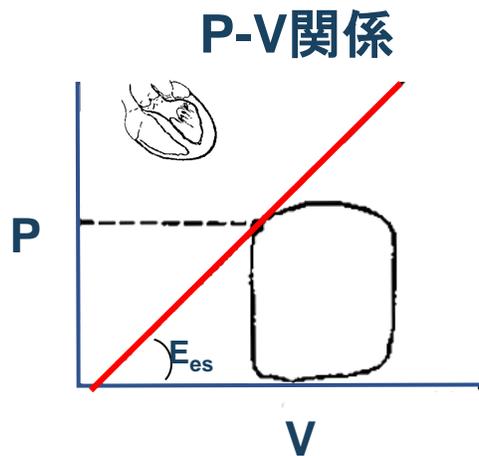
- 任意の心室エラストランス E_{es} 、 R 、 HR 、 EDV に対する SV 、 CO 、 EF が推定ができる
- 上記の条件において圧容積面積 PVA から代謝(MVO_2)が推定できる
- 前負荷 (EDV)- CO 関係、スターリングの法則の記述可能
- 血行動態の全貌が PV loopに可視化され、診断や治療戦略の選択に貢献

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!!!

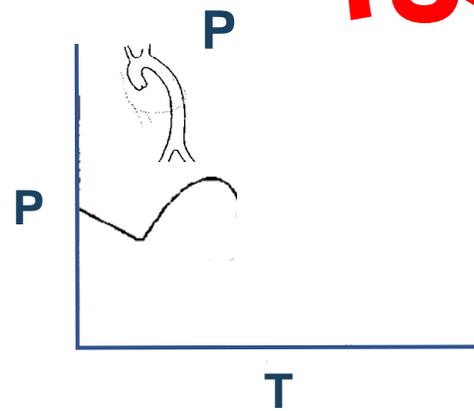
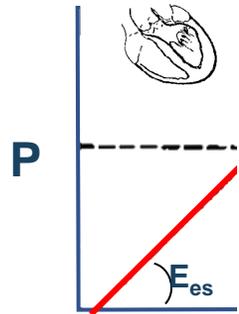


今日の1枚: 動脈のエラスタンス化

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!!!

