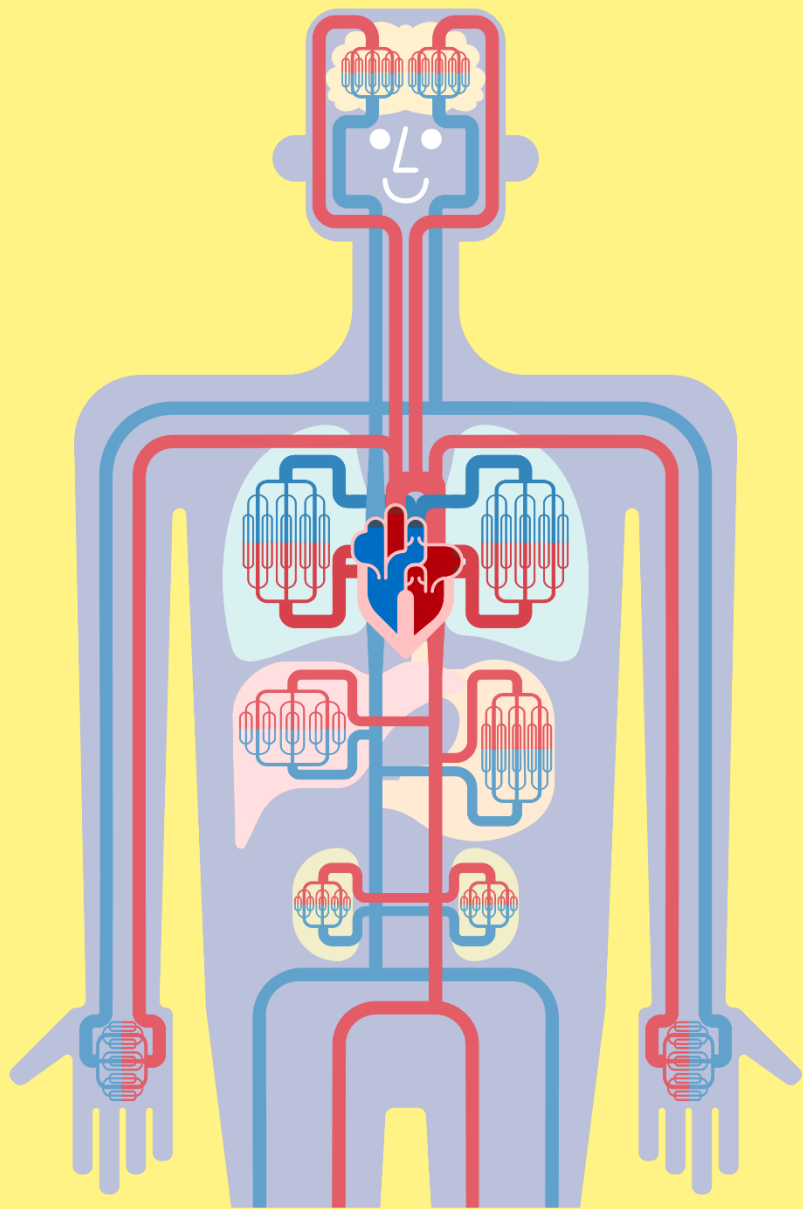




楽しく学ぼう！ 循環動態の基礎

朔 啓太
国立循環器病研究センター



PV loop 温故知新



心臓は硬さが変わる袋？
心臓の収縮性



硬い心臓の意味分かりますか？
心臓の拡張性



前負荷を知ることは全体を知ること
-心臓の前負荷-



後負荷は式展開で理解しよう

今日の内容はこちらを凝縮！

今は循環動態教育の氷河期

1900

1980

E_{max} E_a
Circulatory equilibrium
Frank-Starling curve
PV loop



分子生物学への学問
主軸移行

(考えなくてもできるほどに)
治療が進化



いまここ

問題はなにか？

- 研究としての流行りが終わるのはOKだが、基礎知識としての定着が明らかに不十分だった
- 勉強していると急に深くなる
- 臨床で簡易に直接測定できない→ 解釈が理解度で変化
- **臨床に直結 → 知らないまま患者が救われたらそれでもいいかもしれないが、患者や治療が複雑化、多様化すると、「やっぱり必要」ということになる**

循環動態アカデミーのScope

医療者として知っておくべき循環動態知識を
伝えたい！

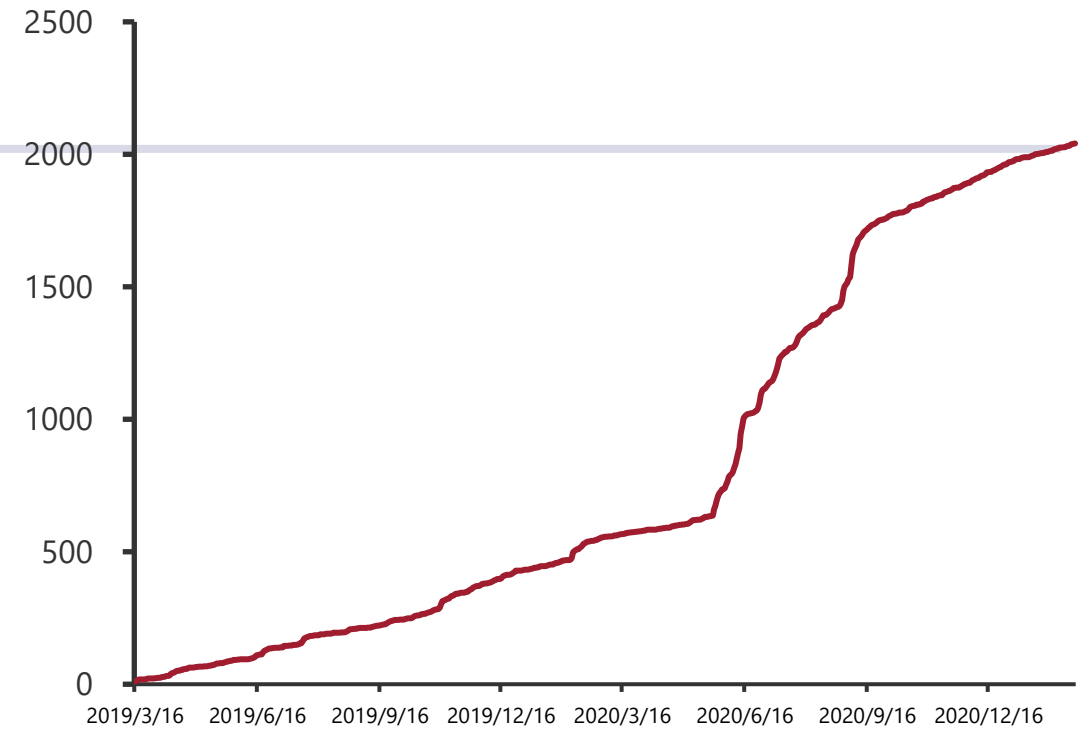
学校や職場でどうもキチンと教えてもらえない
ので知りたい！



**心血管ダイナミクスを正しく知り、
診療に生かす**

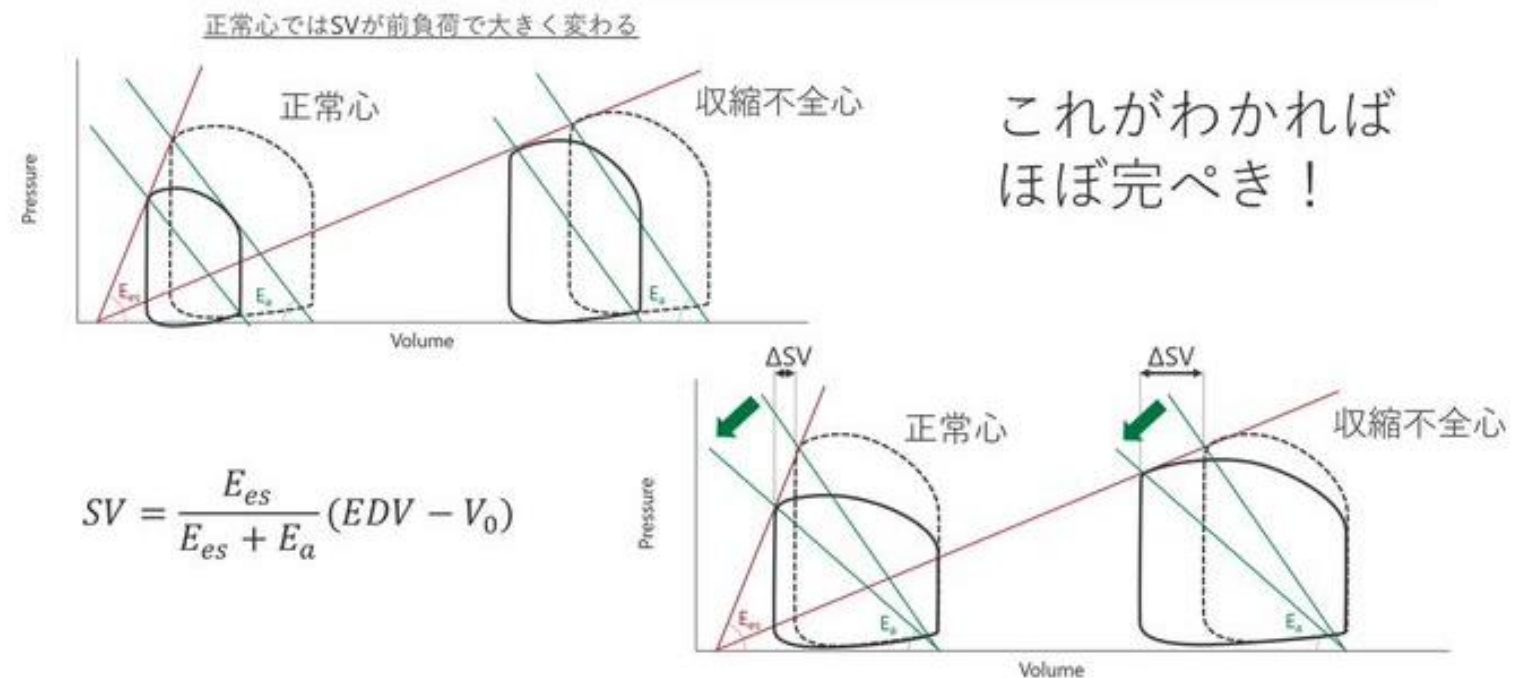
循環動態アカデミー歴史

- 2019年3月にサイト発足
- 100以上の講演スライドを公開
- 2020年2月に初の研究会開催
- 2020年8月の研究会で参加者1000人達成
- サイトは毎日100人以上のユーザーが訪問
- **2021年2月に循環制御医学会とのコラボ**

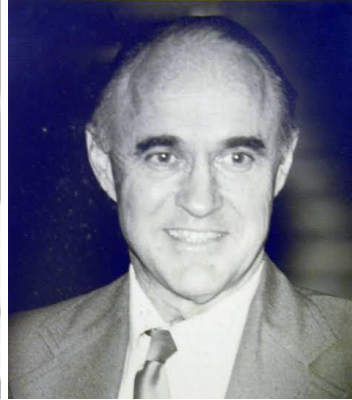


本日のAgenda

- 循環動態研究の歴史
- 循環平衡とPV loop
- 心機能による心拍出量の前負荷依存性と後負荷依存性の変化

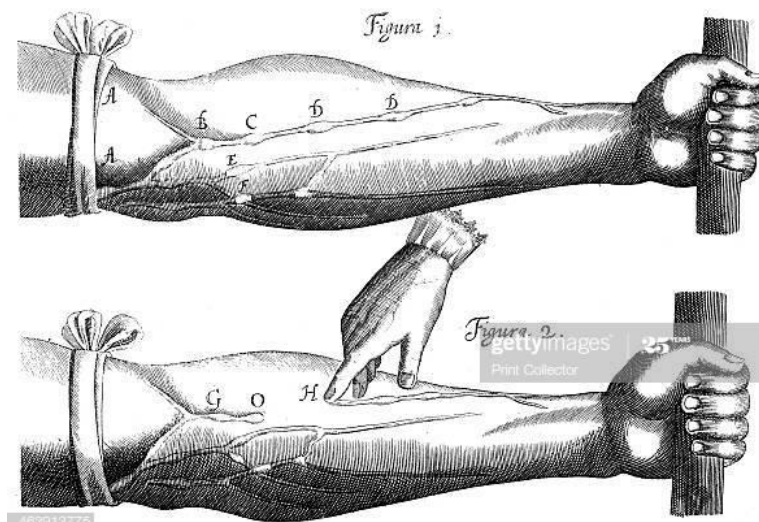
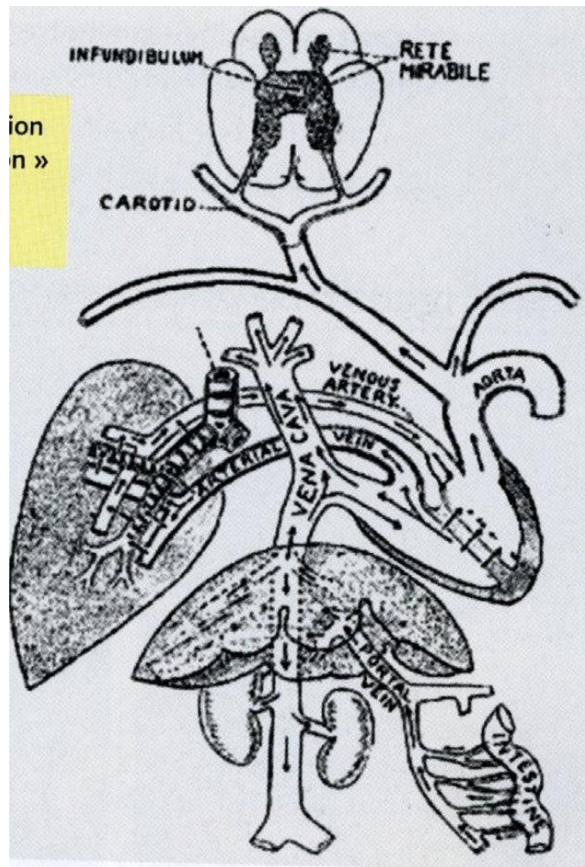


歴史から振り返る



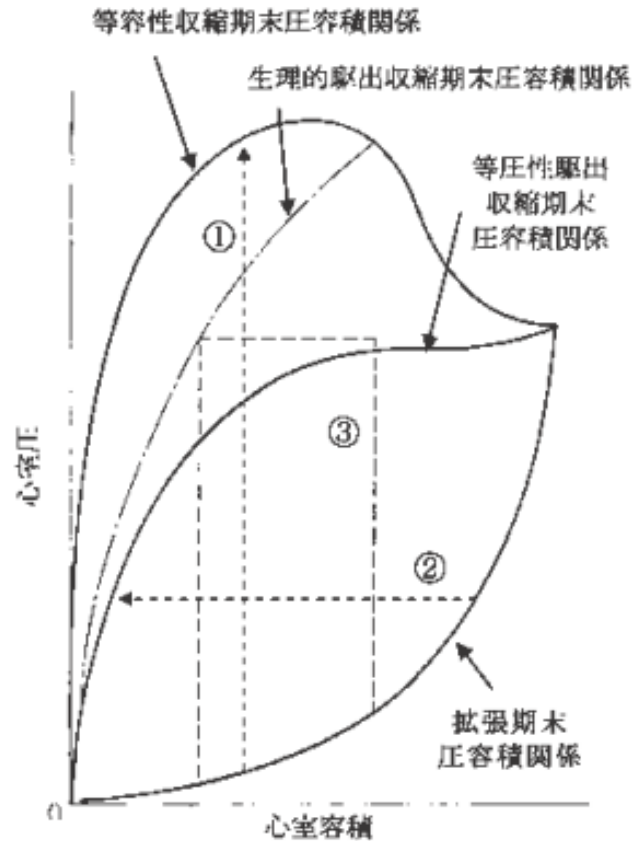
国循の循環動態制御部（循環動態機能部）

血液循環說：William Harvey



1628年

PV loop : Otto Frank



- 摘出した心臓に任意の圧負荷を加える実験を行った
- 心室の機能を圧と容積および時間で記述した
- 心室の充満度合が増すと外的仕事量がますということを観察した
- PVA = 酸素消費という概念の基礎を作った
- その他 (心拍出の測り方、血圧計の問題点)

参考論文

Sagawa et al. Translation of Otto Frank's Paper.
JMCC 1990

Rediscovery of Otto Frank's contribution to Science.
JMCC 2018

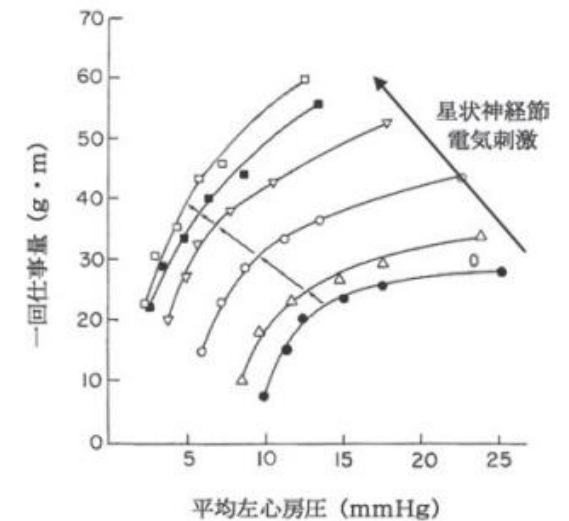
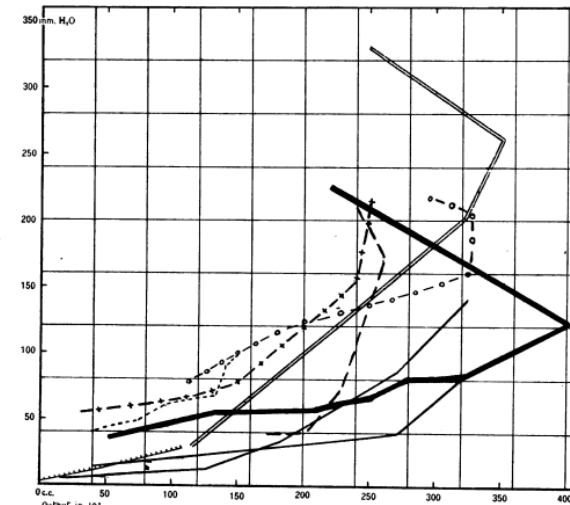
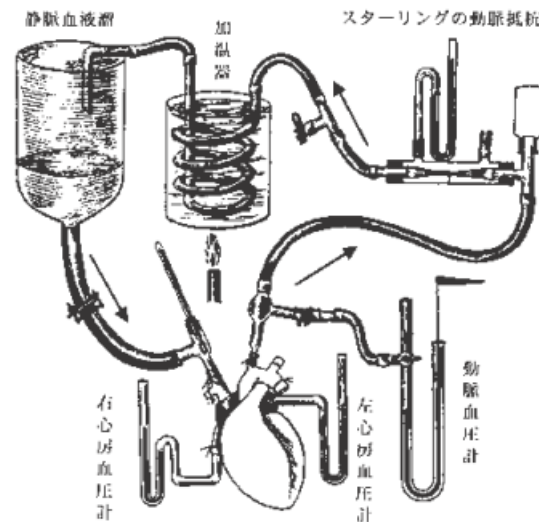
1895年

カエルの心臓で心室圧容量関係を示した

CO curve : Starling/Sarnoff



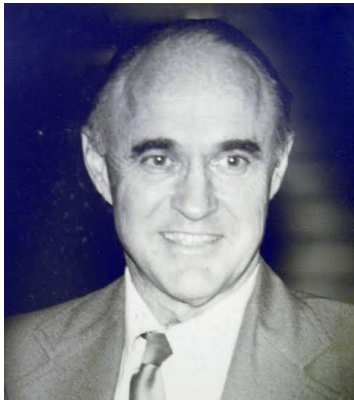
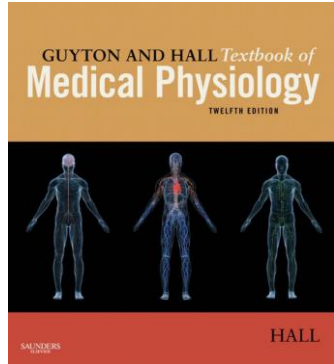
- 右心房の平均充満圧を増して行くに連れて心臓の拍出量が増加してゆくことを見いだした (cardiac output curve)
- 収縮性により、心室機能曲線 (ventricular function curve) が変わることを示した



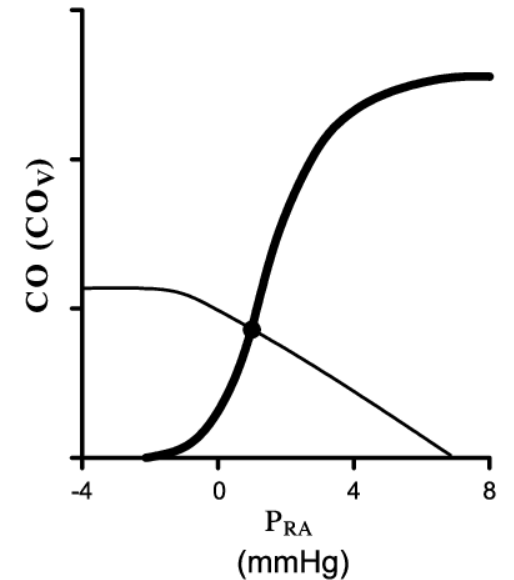
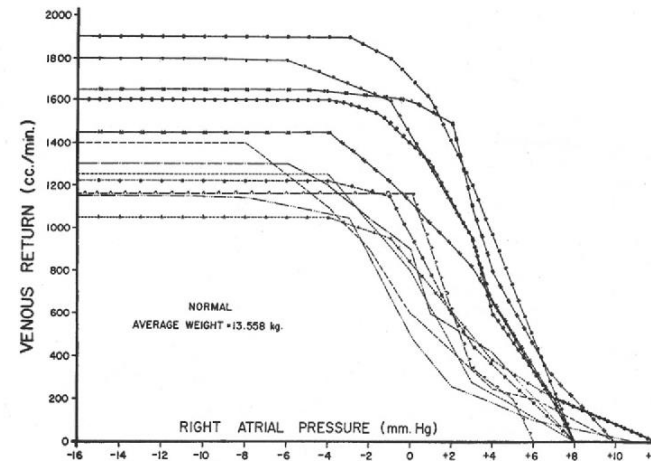
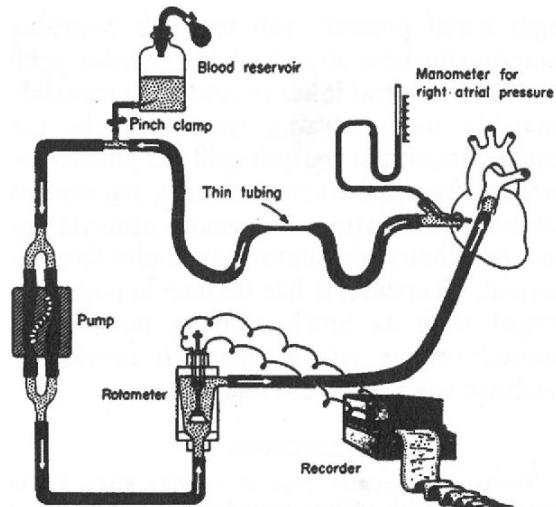
心臓の外的仕事の前負荷の関数となる

1920～1950年

Circulatory equilibrium : Guyton



- 平均循環充満圧を起点とした静脈還流曲線をみごとな実験系で示した
- 心臓を止めて、循環中の圧が一定となった圧を平均循環充満圧と定義し、右房圧を下げたときに、血液が流れ込んでくる量をプロットすると静脈還流曲線が表れる。
- 循環の動作点は心機能曲線と静脈還流曲線の交差点であることを示した

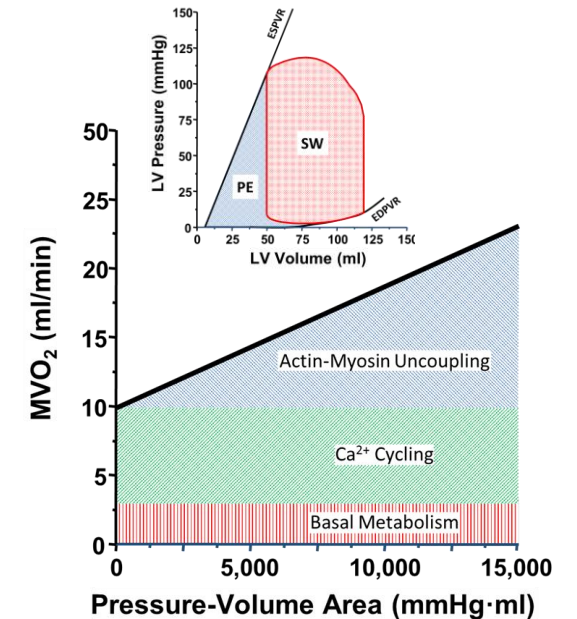
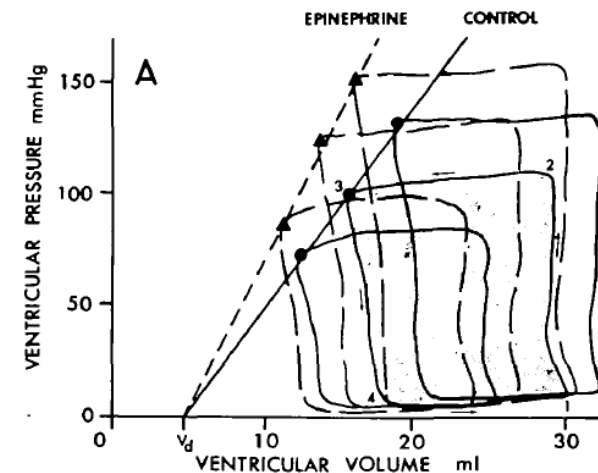
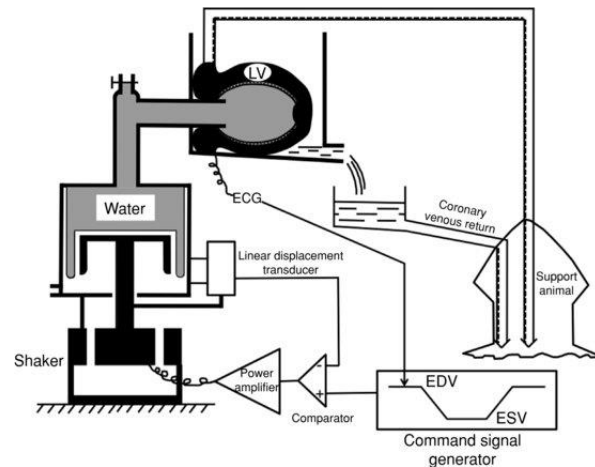


循環平衡により循環動態を明快に記述

Cardiac function in PV loop : Sagawa/Suga



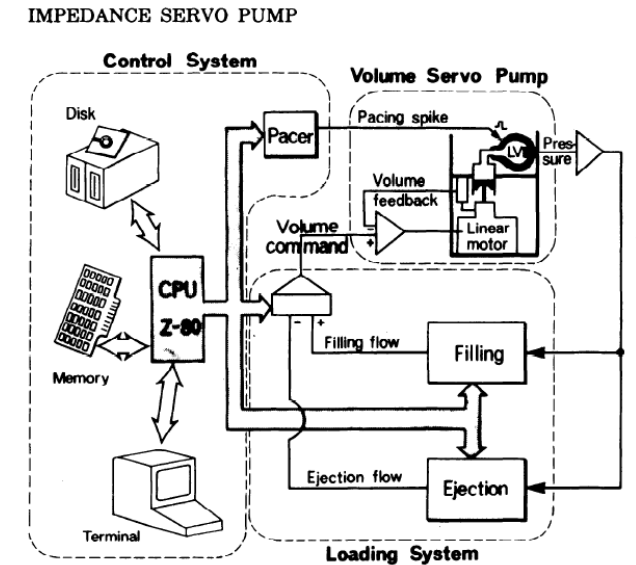
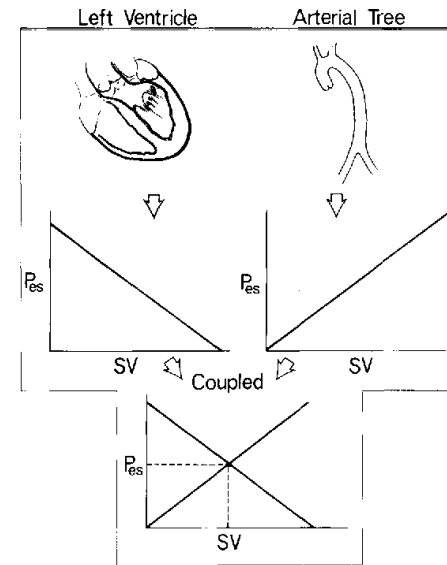
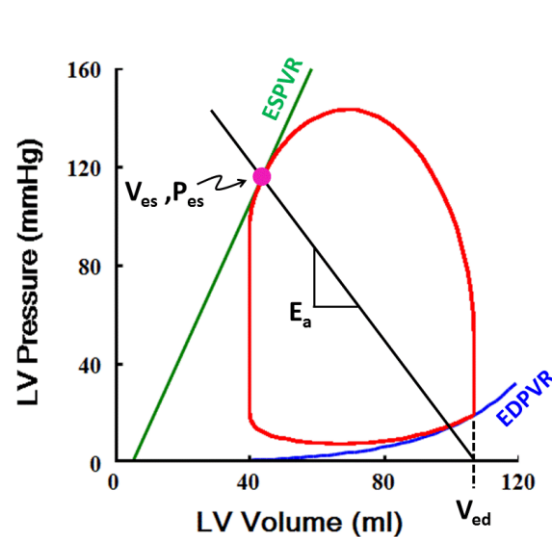
- 哺乳類では負荷様式非依存に収縮末期圧容積関係の直線がひける (ESPVR)
- 心室時変弾性特性
- ESPVRの傾き ($E_{\max}$) は収縮性を示す
- PV loopの酸素消費量への展開



心収縮性と心臓仕事を決定的に定義づけた

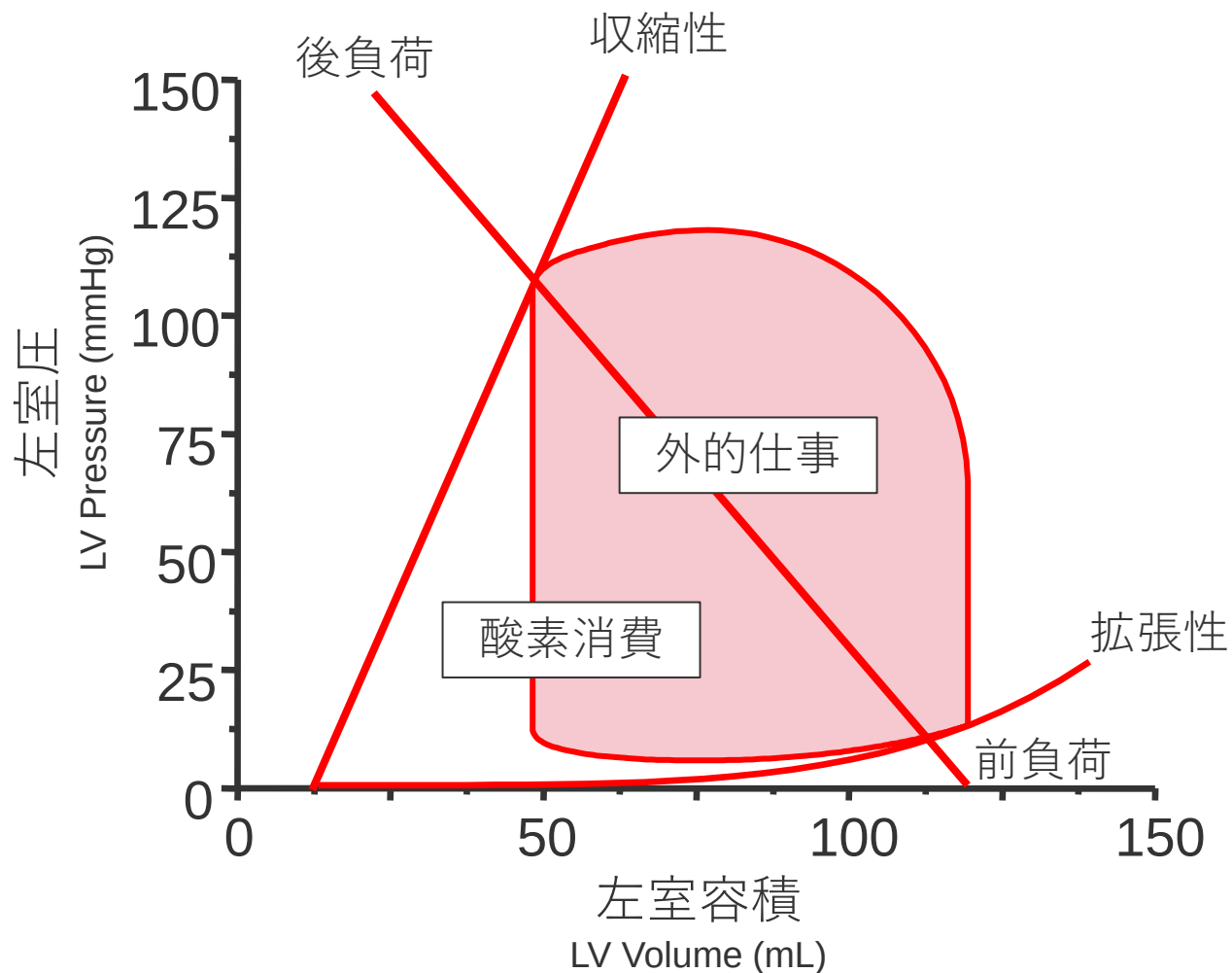
Afterload in PV loop : Sunagawa

- 心室の後負荷としての実効動脈エラスタンスのコンセプトを提唱
- さまざまな血管特性を心室にloadできる仕組みを作り同コンセプトを証明
- (拡張ガイトンモデルを提唱)



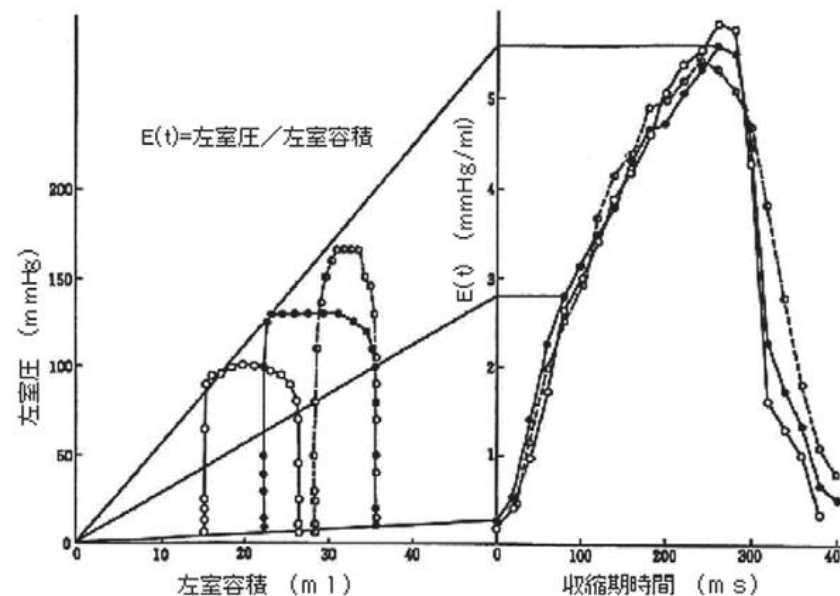
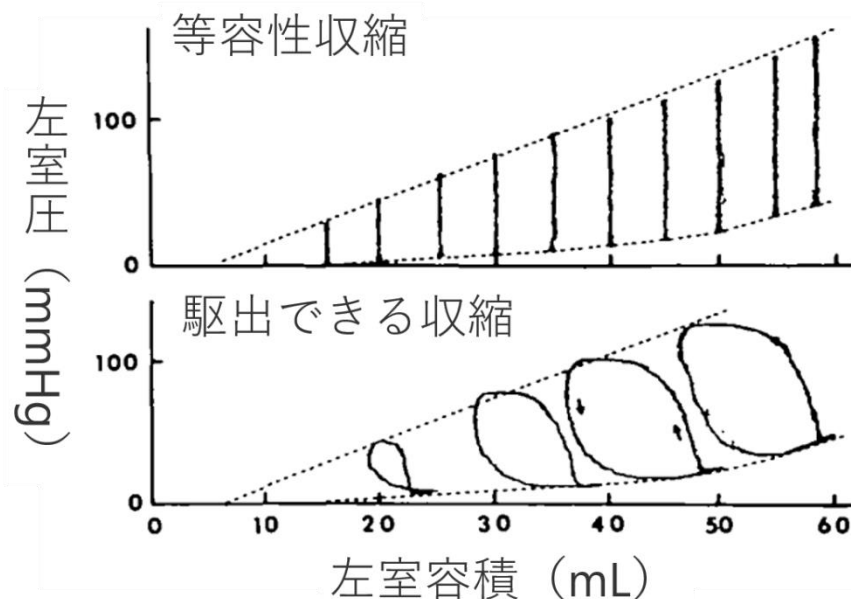
1心拍における後負荷を定義し、SVの決定機構を解明

心機能が透けて見えてこそそのPV loop



- 心臓の収縮性と拡張性
- 心臓の前負荷と後負荷
- 心臓の仕事量

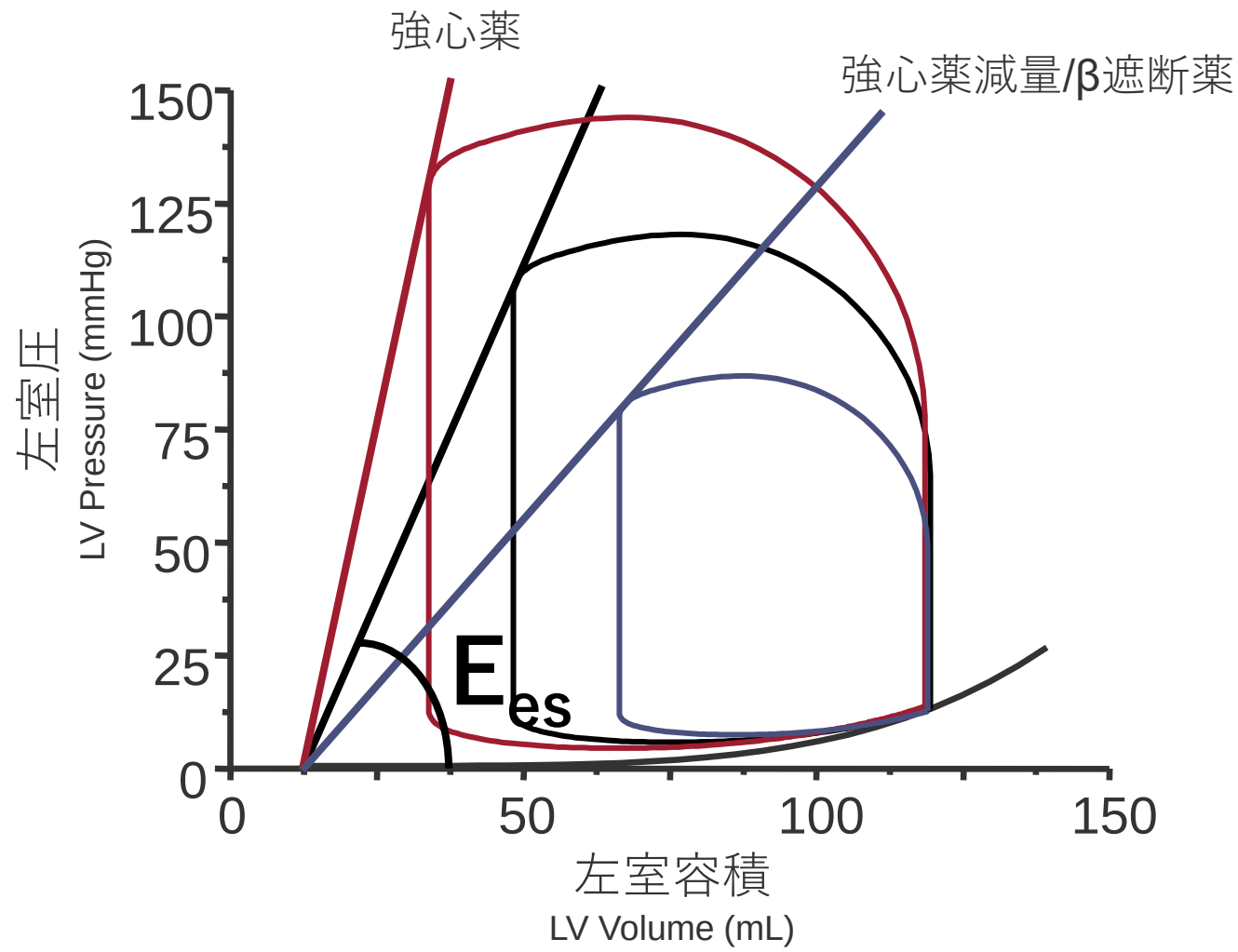
ESPVRの傾き = 収縮性



- 負荷様式を変えても最大の収縮期圧容量関係が変わらず直線が引ける。
- 心室の硬さが心周期内で変わることに着目し、時変弾性モデルへと展開させることで、見事に「心機能」を記述した。

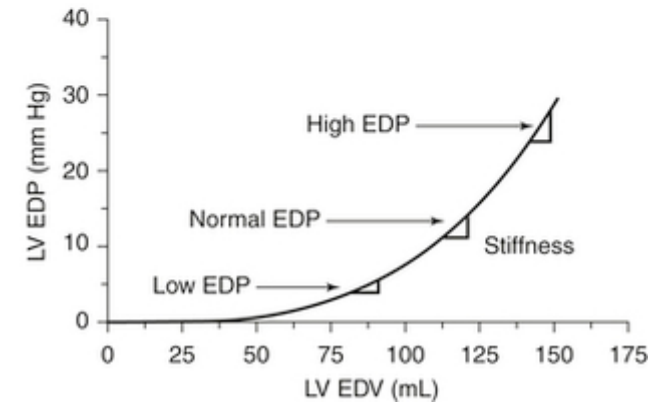
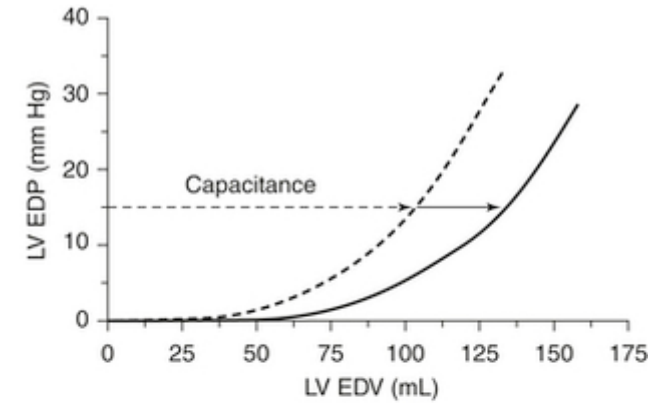
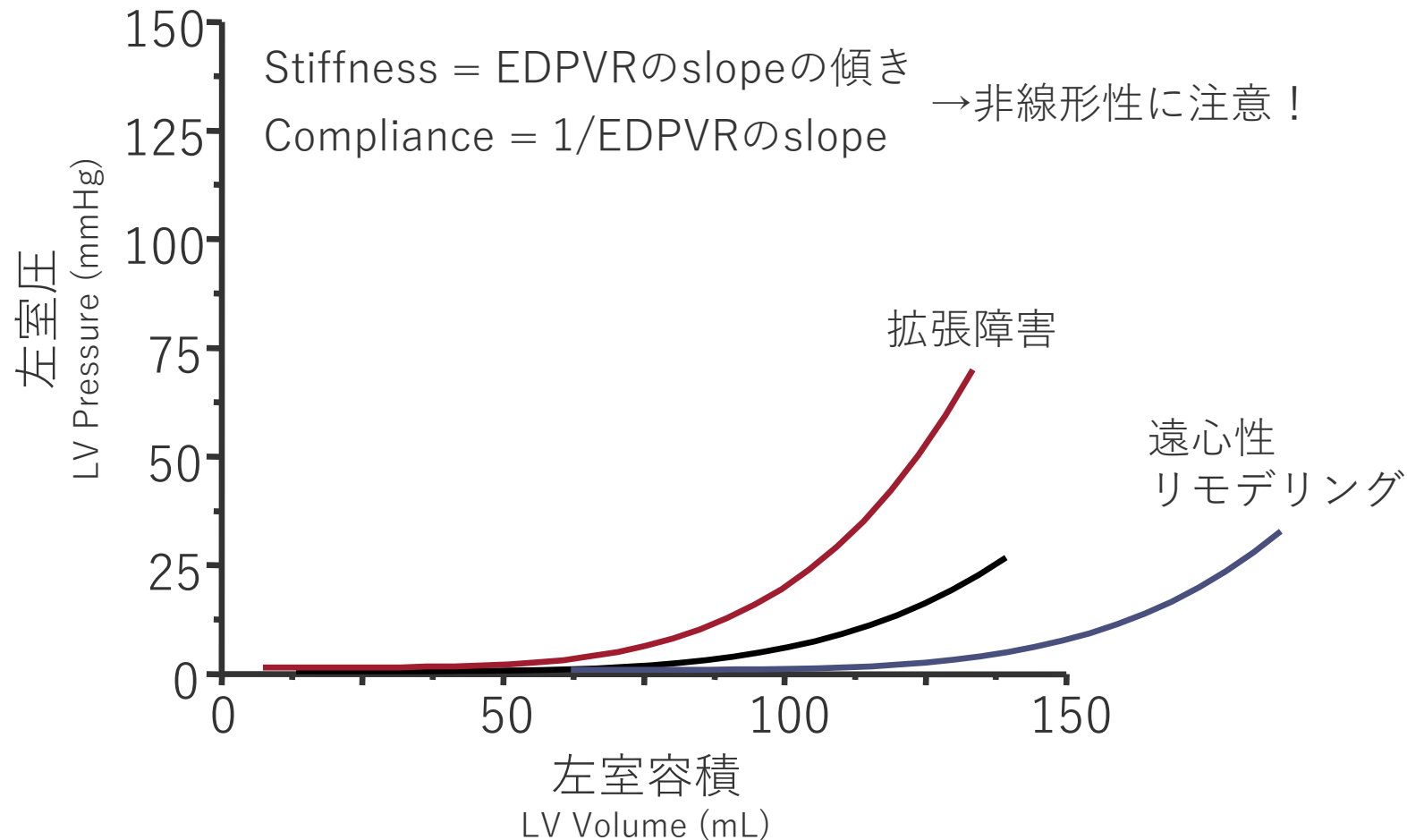
ESPVRの傾き = 収縮性

※敢えてEDVが同じ場合

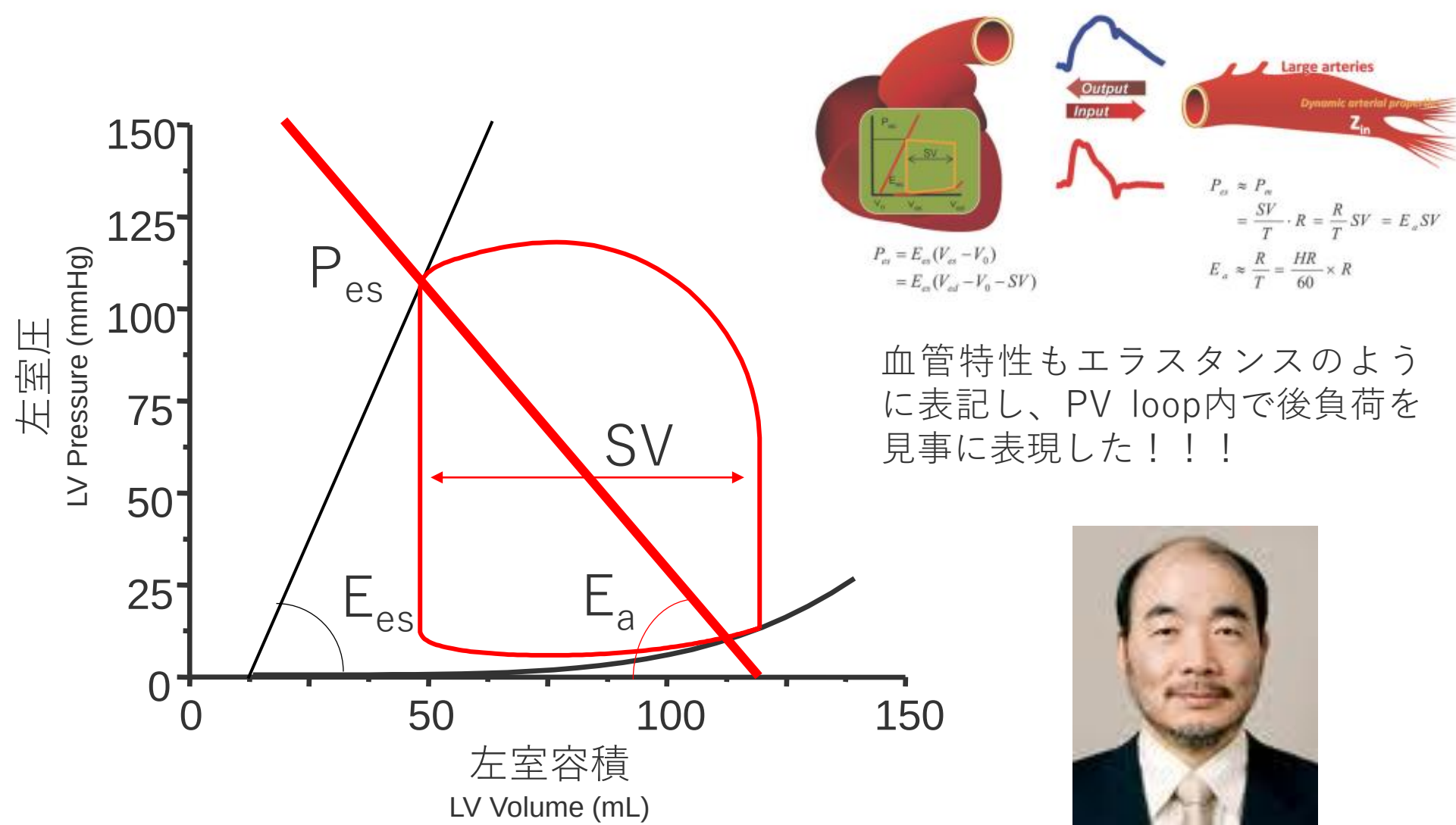


EDPVR=拡張特性

- 左室の拡張末期圧容量関係は非線形



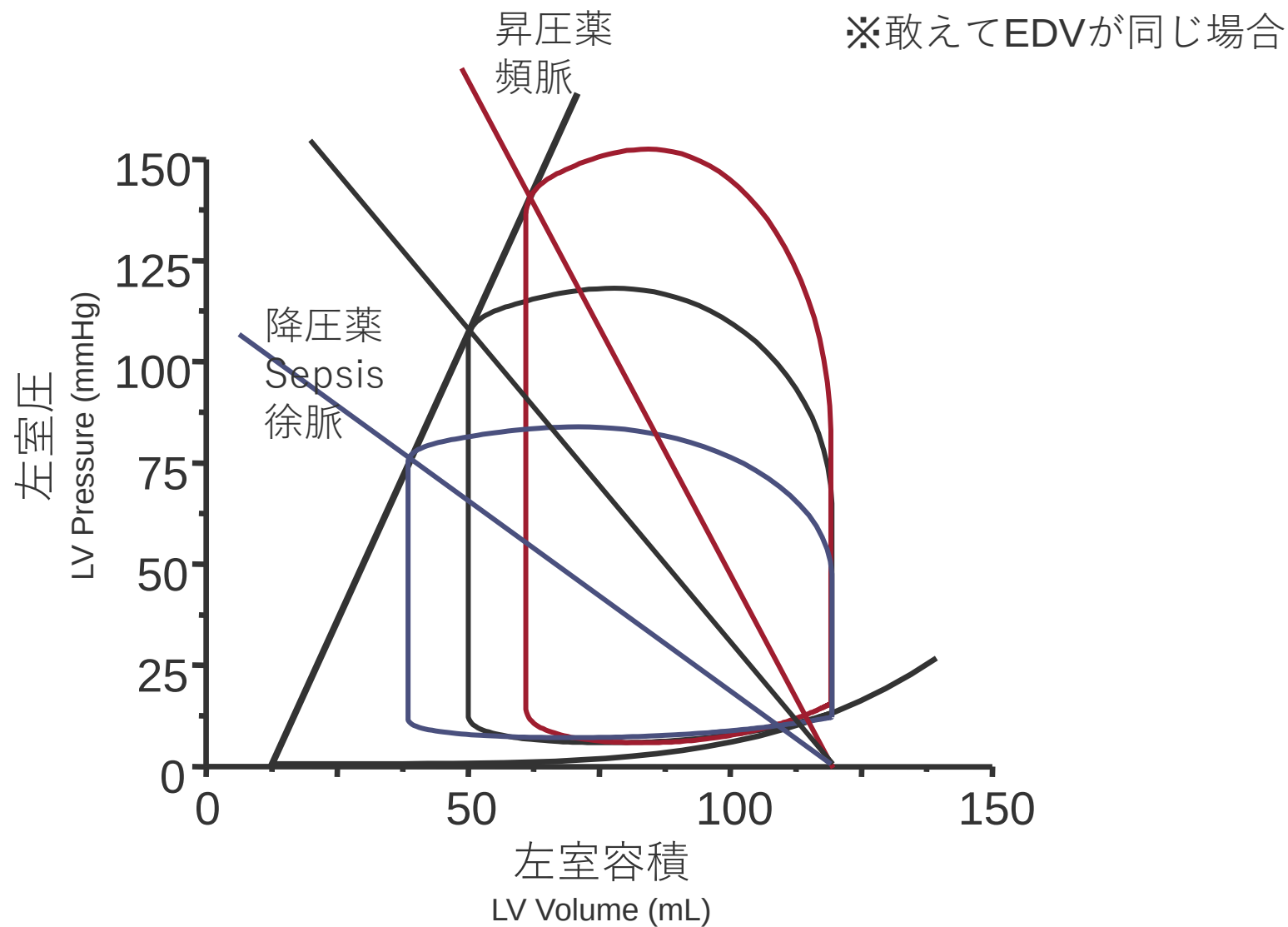
$E_a = R \times HR = 1$ 回心拍出における後負荷



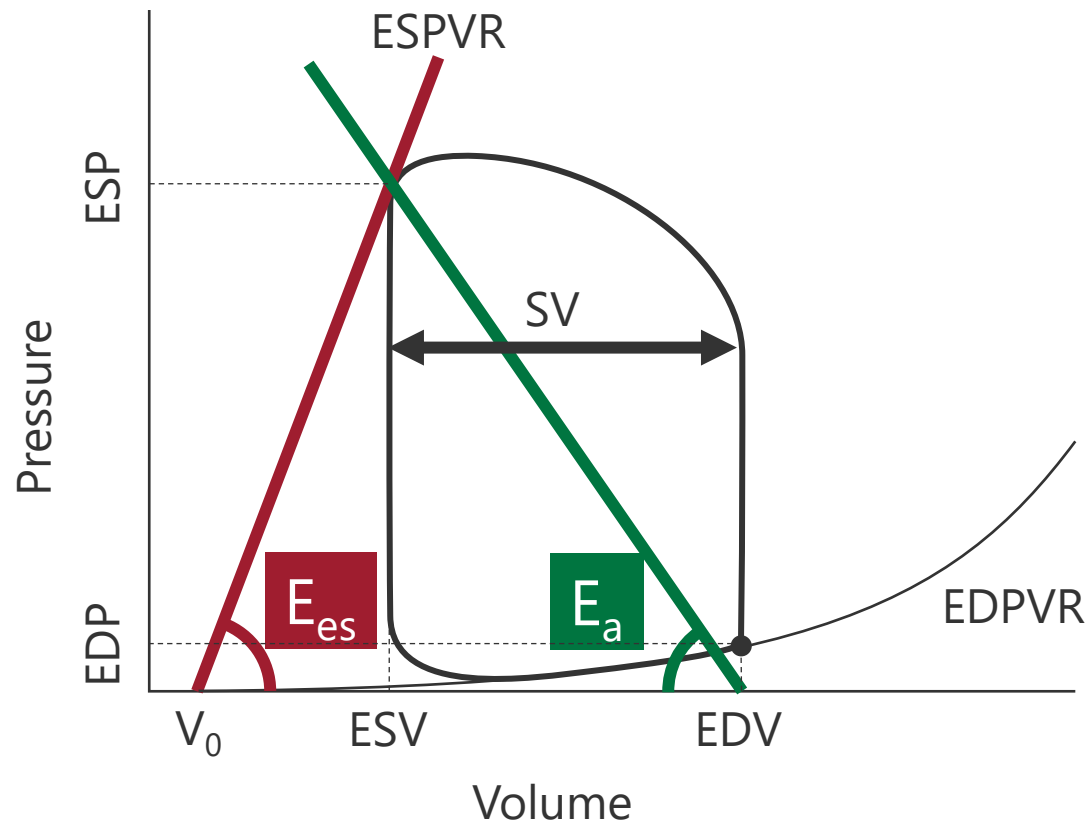
血管特性もエラスタンスのように表記し、PV loop内で後負荷を見事に表現した！！！！



$Ea = R \times HR = 1$ 回心拍出における後負荷



E_a と E_{es} のバランスおよび前負荷でSVが決まる



E_{es} , E_a , SVは

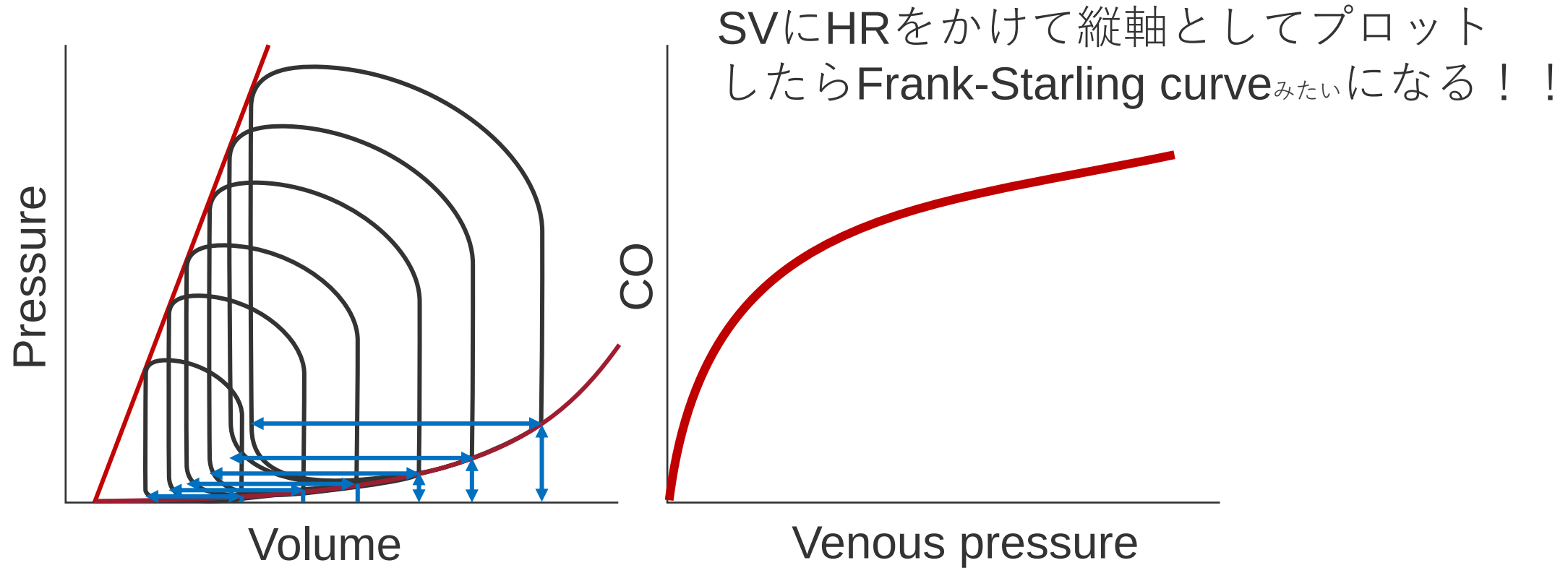
$$\left\{ \begin{array}{l} E_{es} = \frac{ESP}{ESV - V_0} \\ E_a = \frac{ESP}{SV} \\ SV = EDV - ESV \end{array} \right.$$



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

実効的な駆出率 (EF_e)

心拍出量曲線の成り立ち – PV loopからの連続性 –



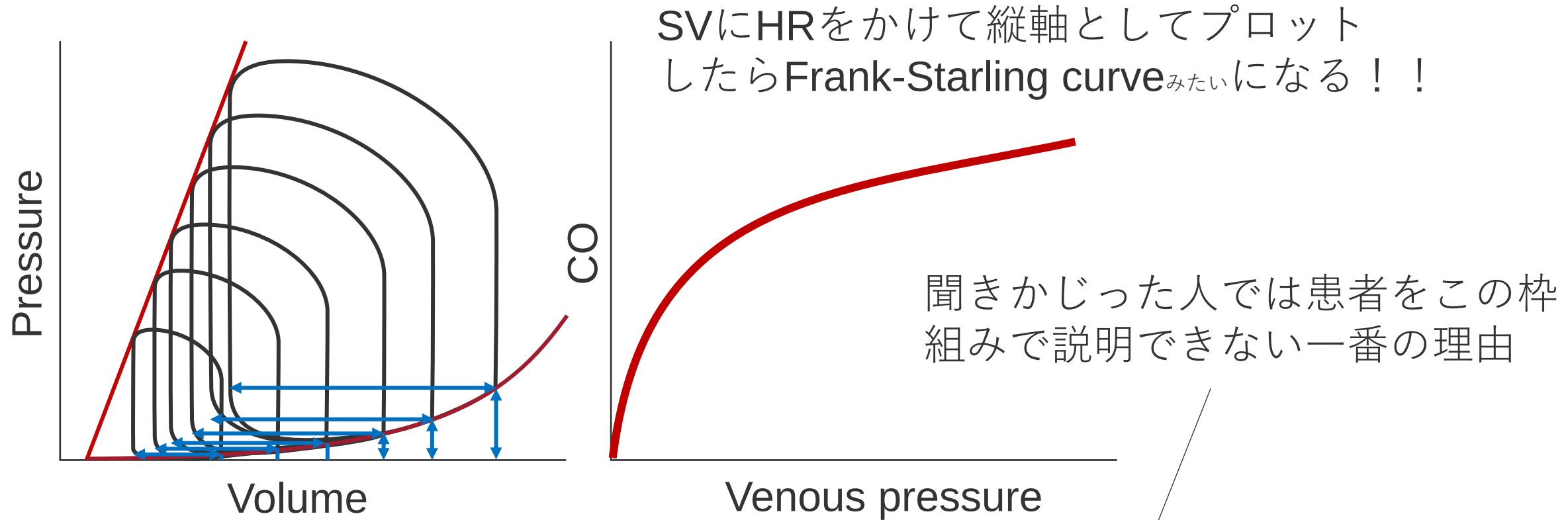
SVはPV loopで定義される

👉 SVは収縮性、拡張性、後負荷と前負荷で決まる

👉 COは収縮性、拡張性、後負荷、前負荷と心拍数で決まる

※後負荷には心拍数もかかわる

心拍出量曲線の成り立ち – PV loopからの連続性 –

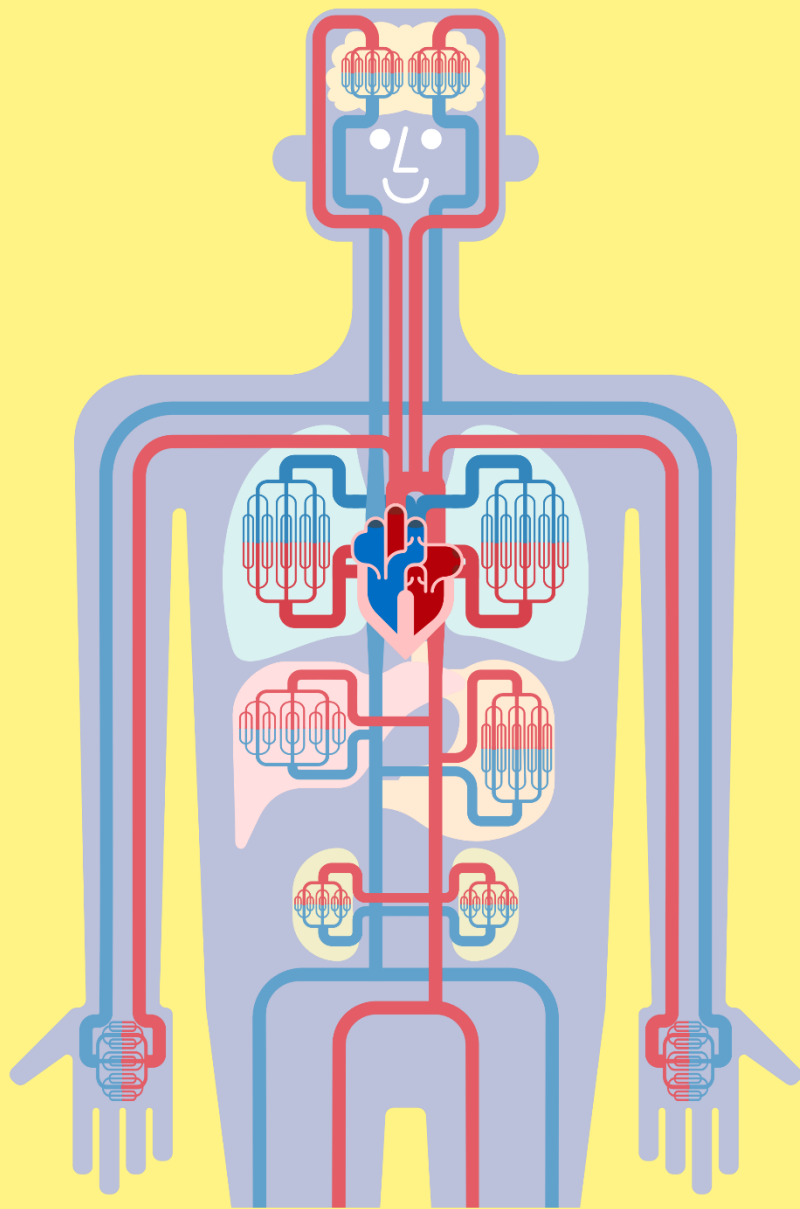


SVはPV loopで定義される

👉 SVは収縮性、拡張性、後負荷と前負荷で決まる

👉 COは収縮性、拡張性、後負荷、前負荷と心拍数で決まる

※後負荷には心拍数もかかわる



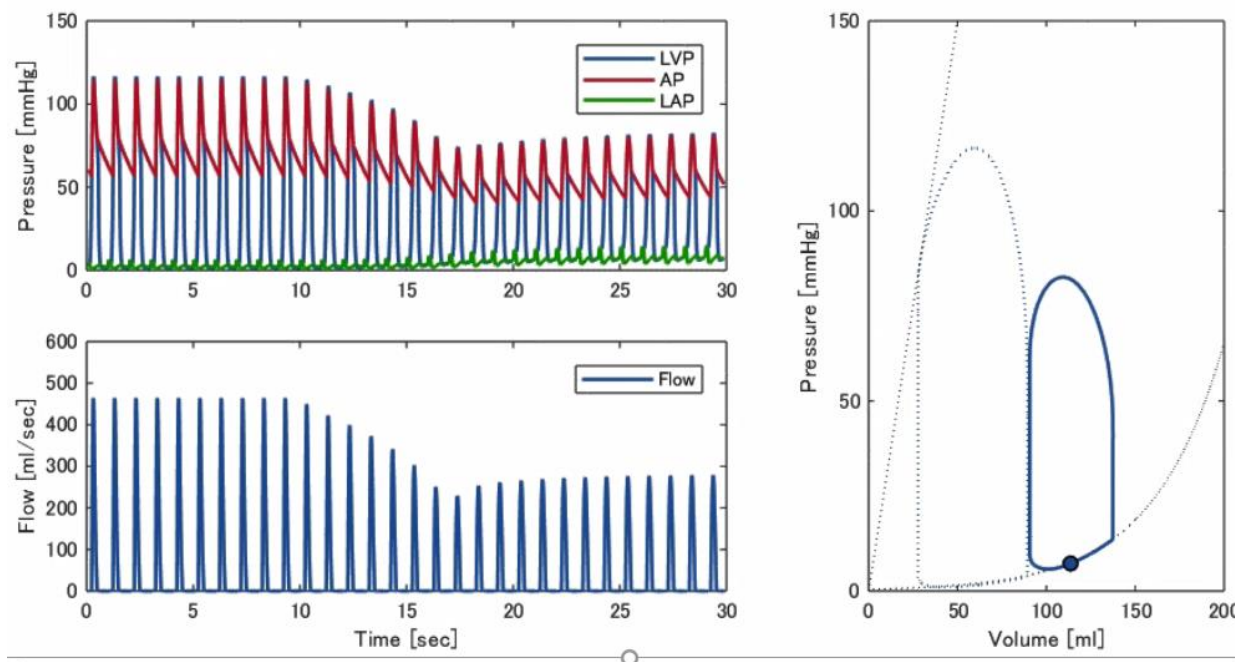
心機能→循環へ

問題です

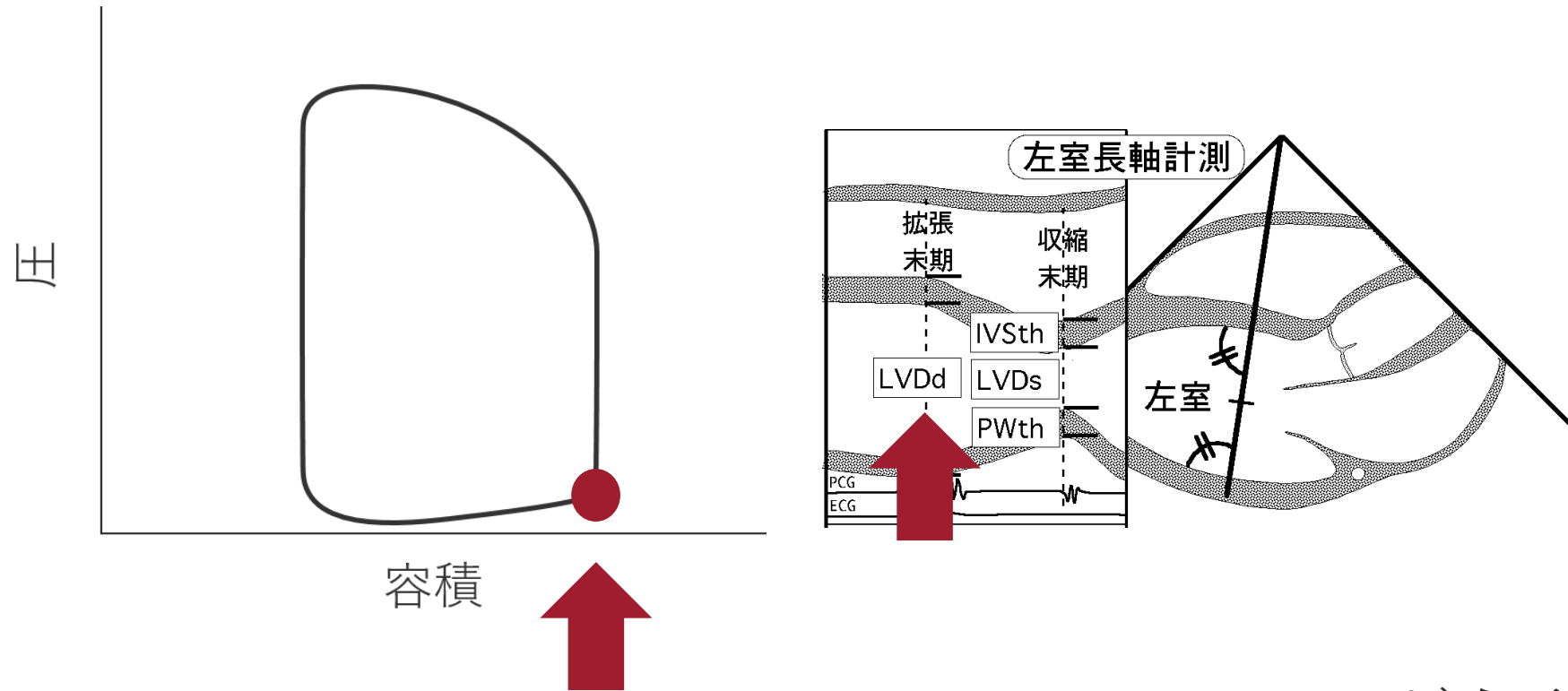
さきほどの動画は、心筋梗塞で急に心収縮能が低下した心臓です。

輸液などはしていませんが、LVEDV（拡張末期容量）が増加しています？

さて、理由は何でしょう？



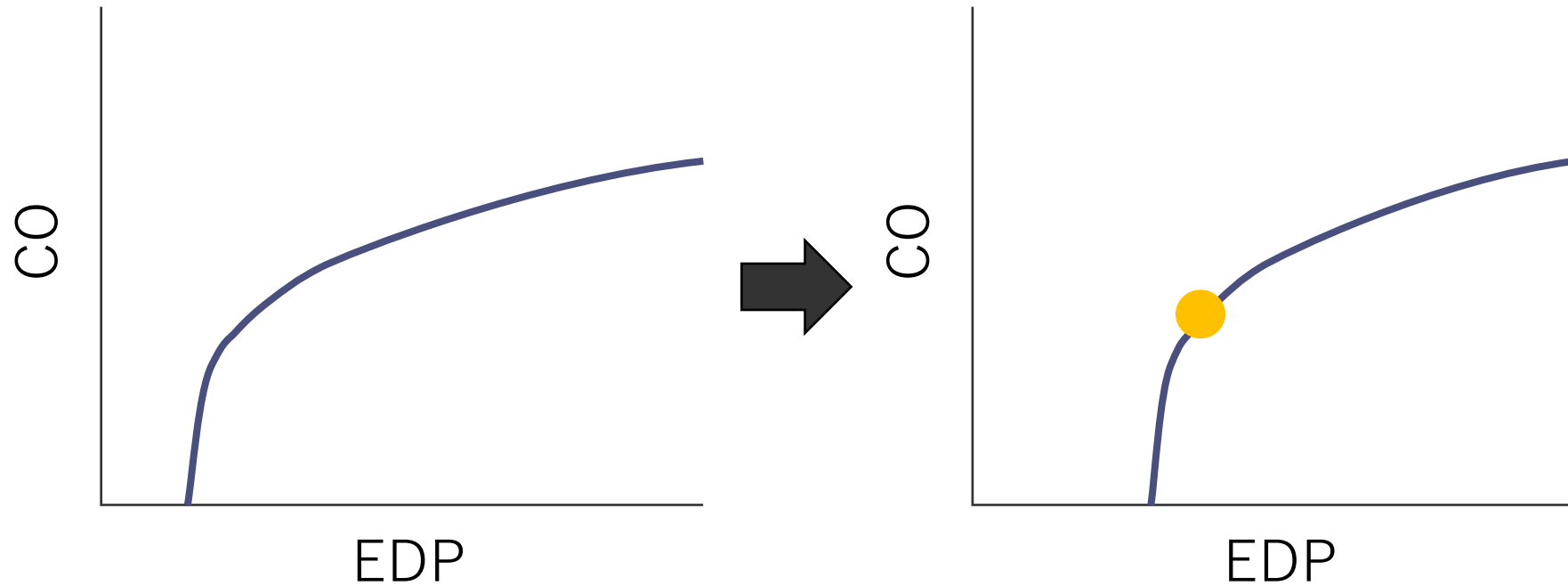
心臓の前負荷とは？その決定因子は？



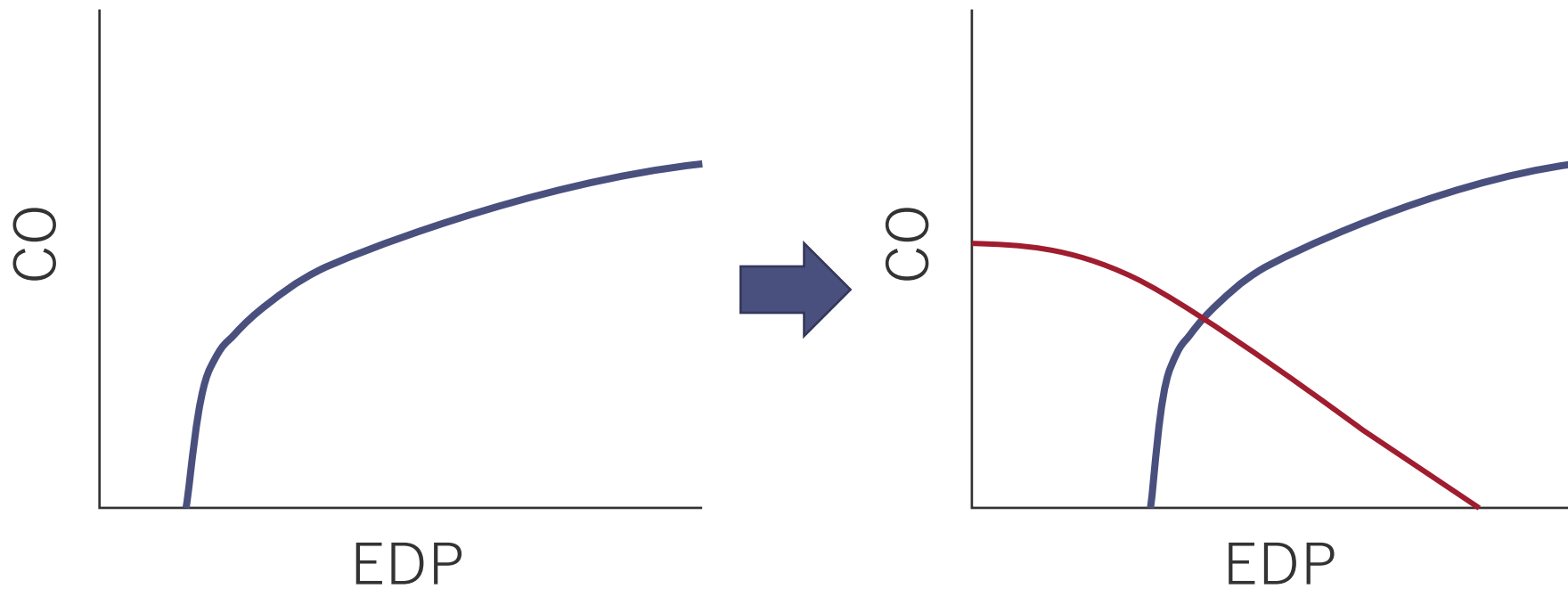
どうやってこの点が
決まっているのか？

心機能だけでは前負荷は決まらない

この時点では前負荷は横軸！

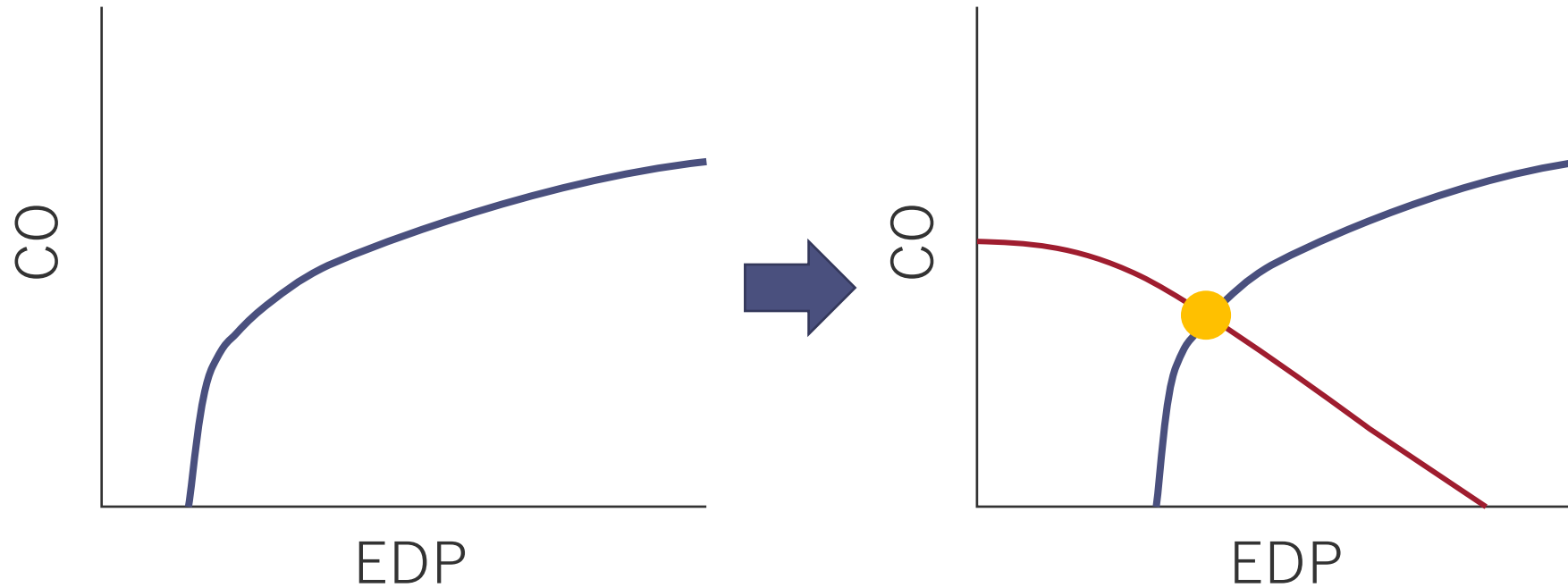


赤い線が見えるでしょうか？

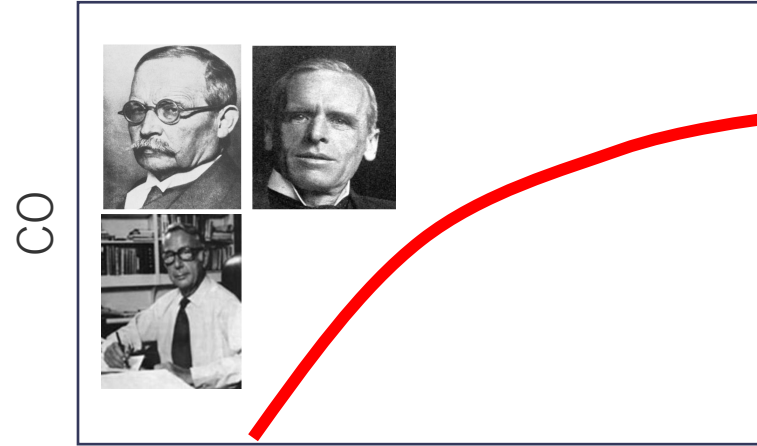


静脈還流との交差 = 動作点

静脈還流が重なって動作点が決まり、任意の前負荷が決まる！



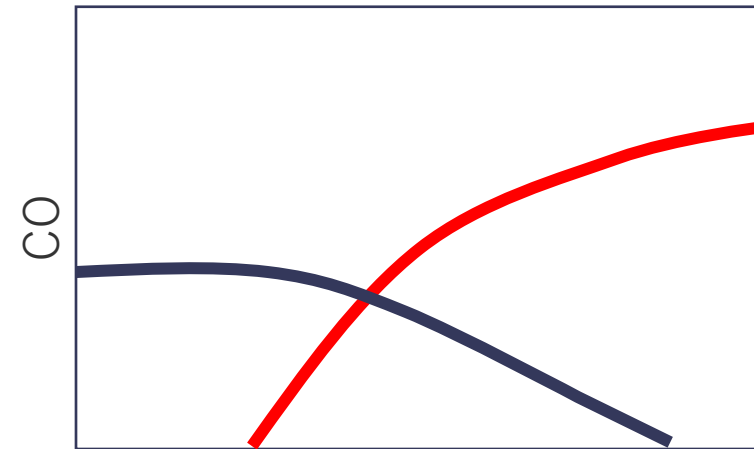
合体 = 循環平衡



RAP

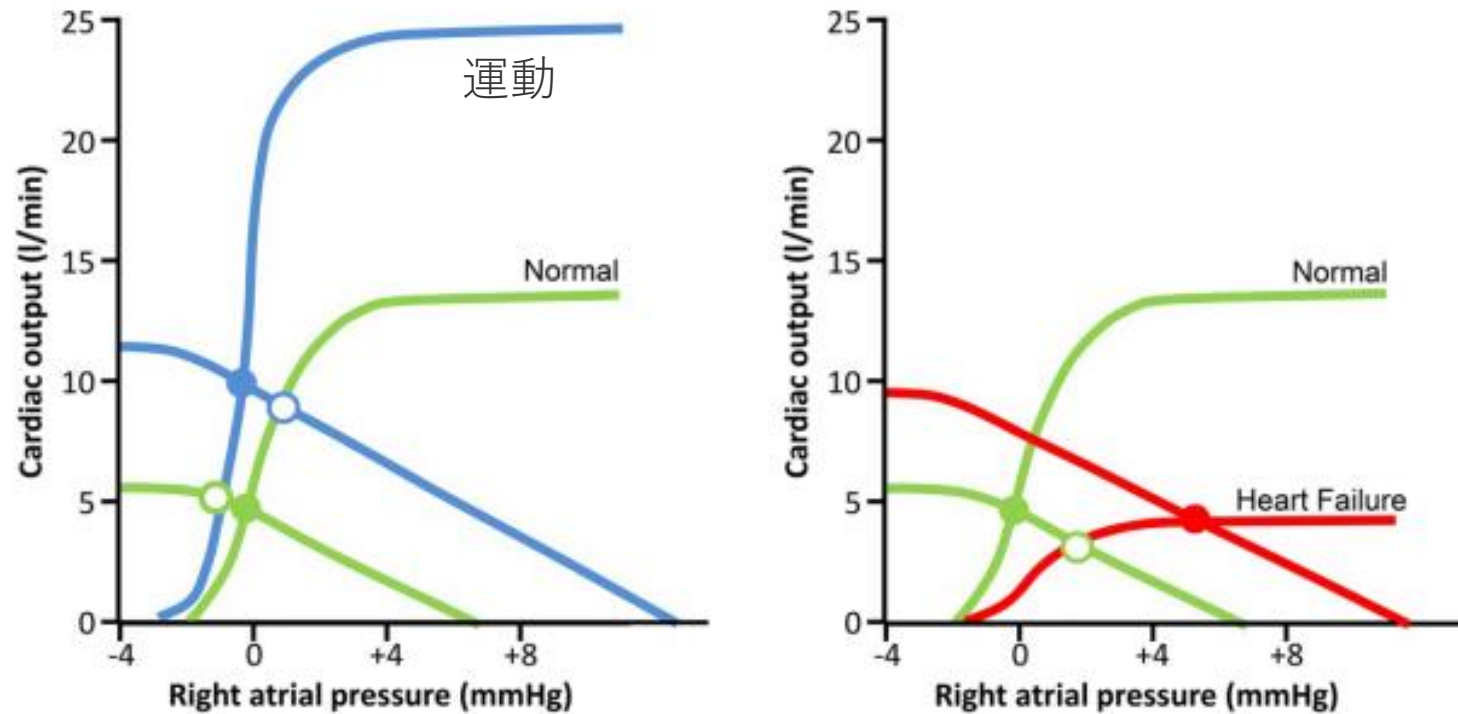


RAP



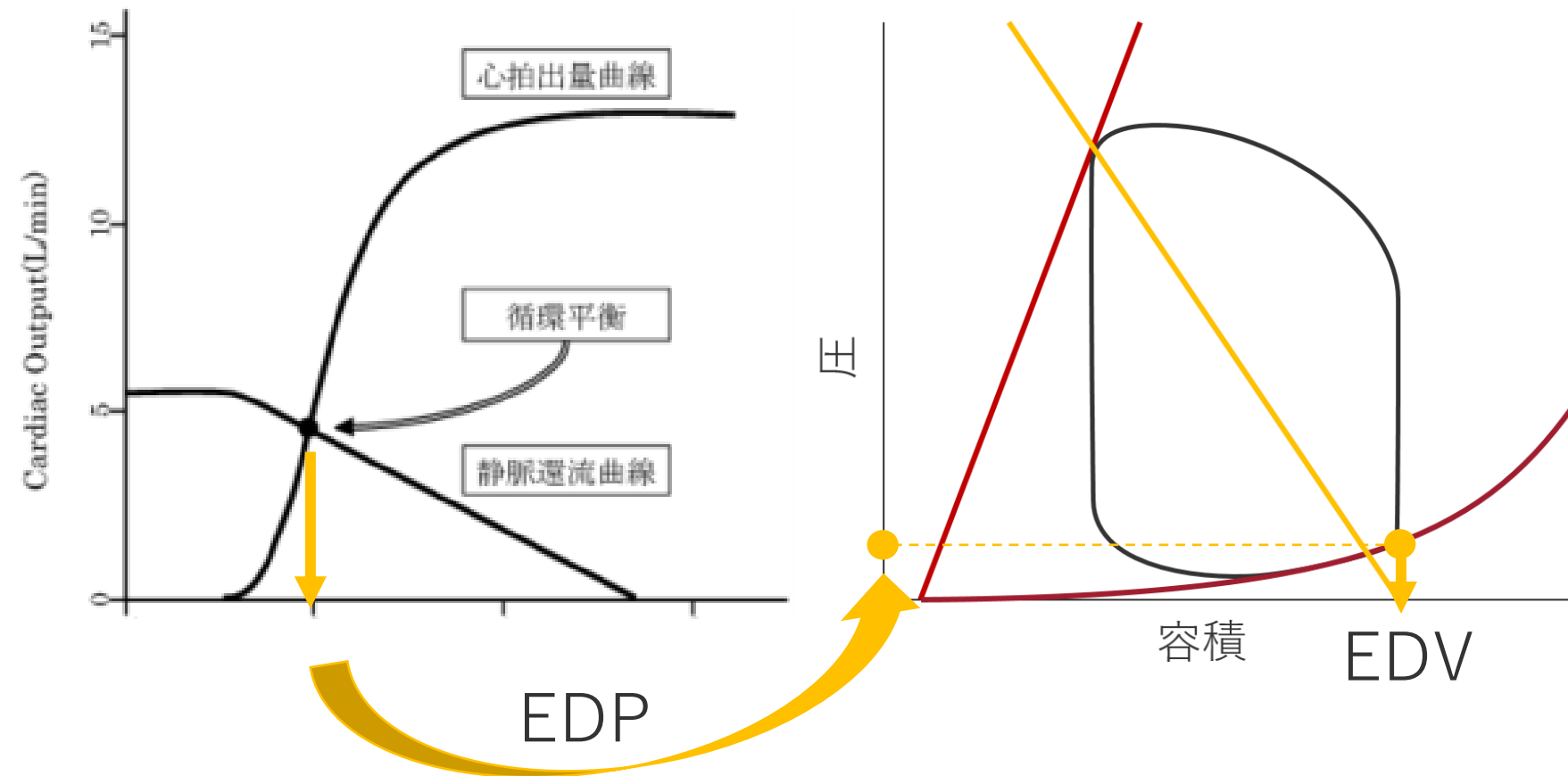
RAP

循環平衡で前負荷が決まる

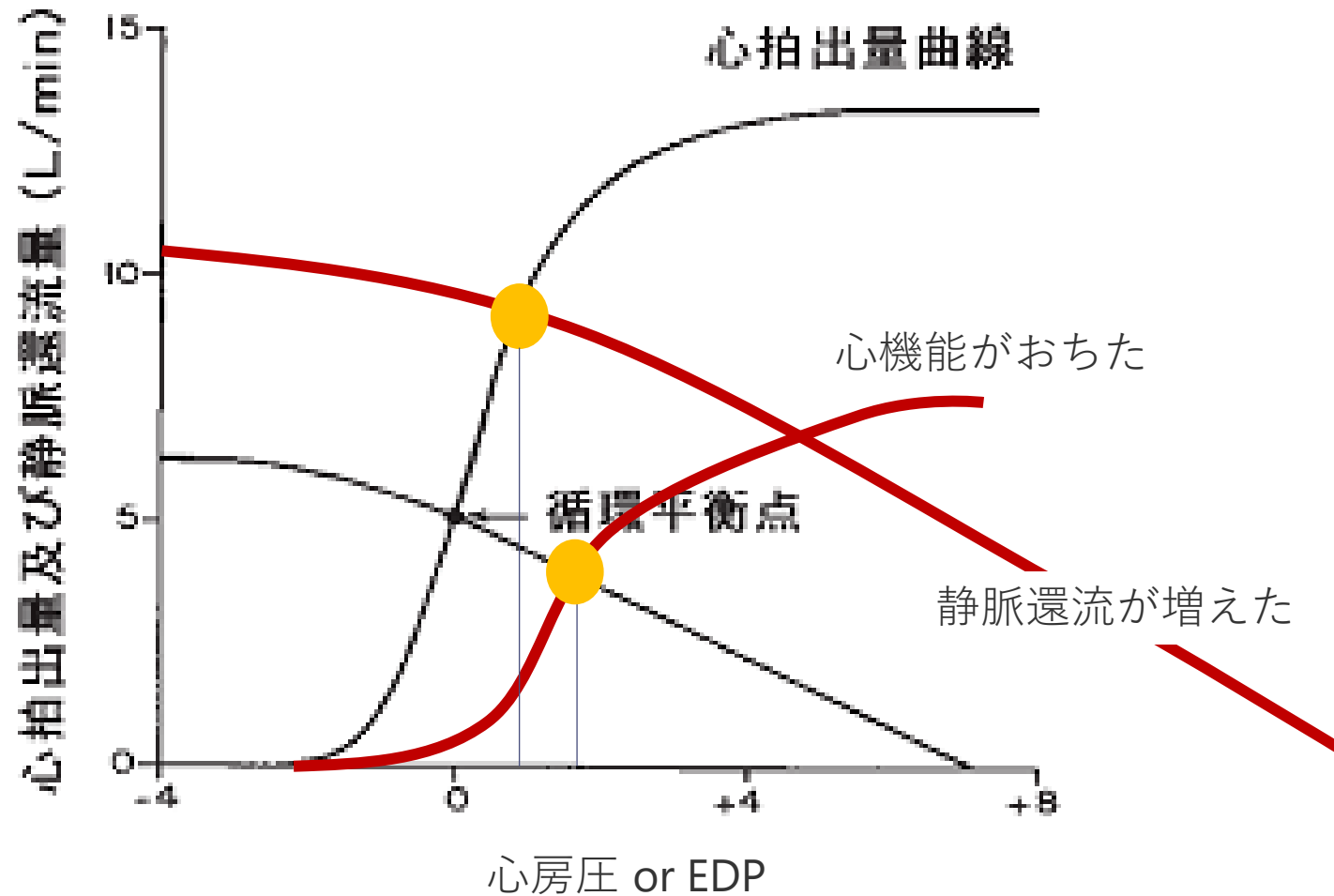


美しくシンプルに正常/病態が記述
→ガイトン最強説

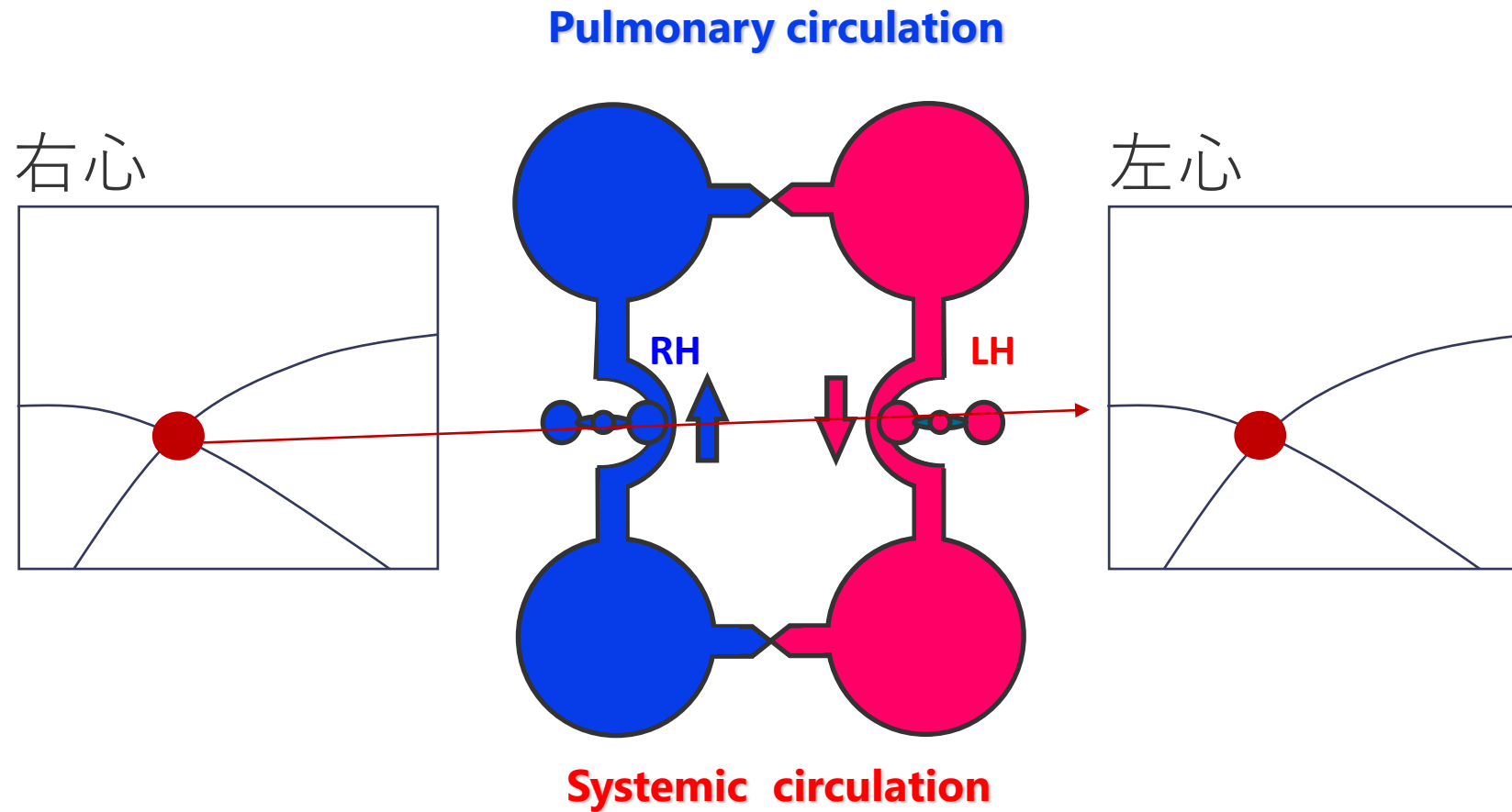
Back to PV loop



前負荷はさまざまな要素で決まる

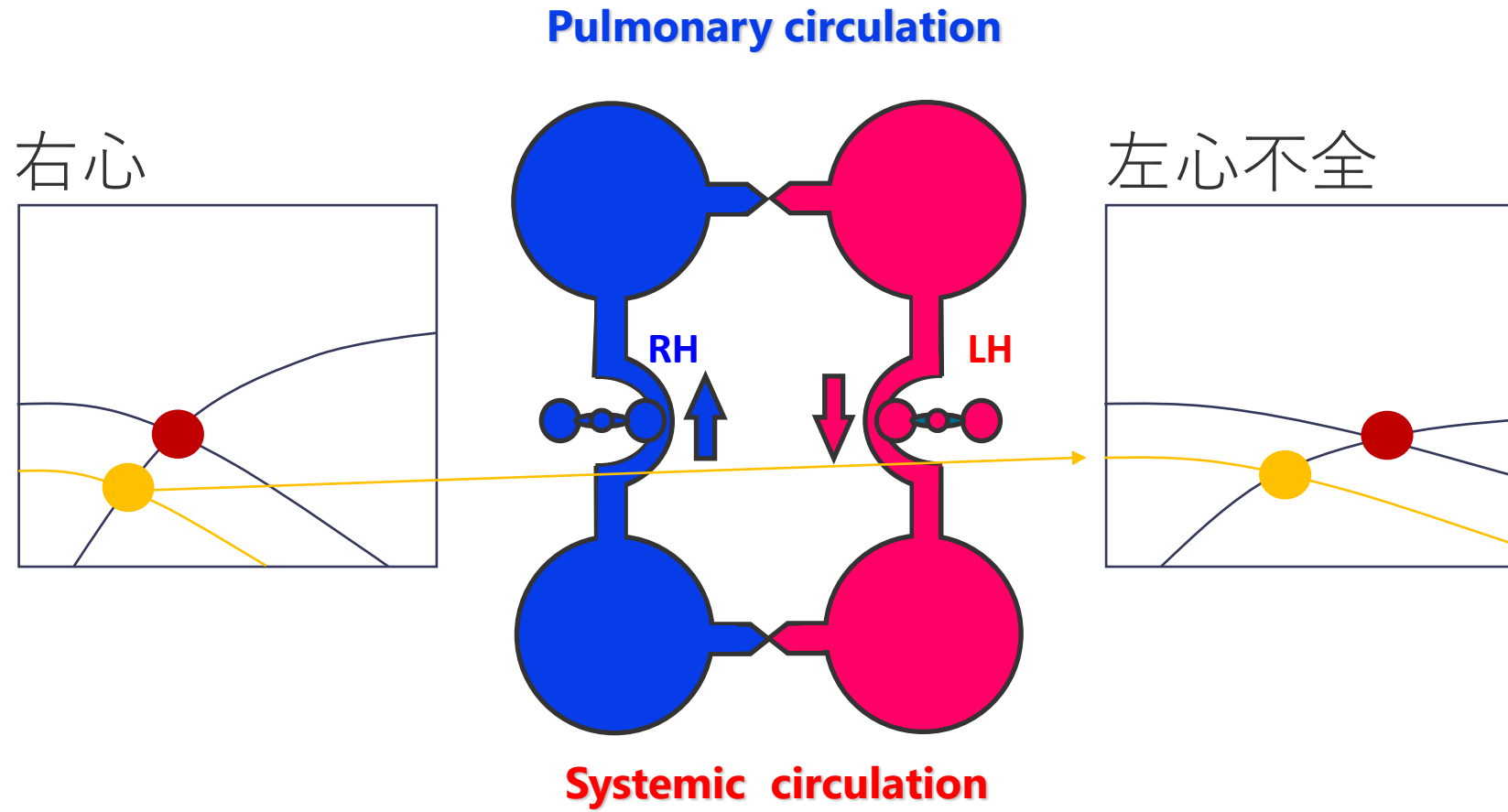


人体は2心室＝臨床ではこう考える！



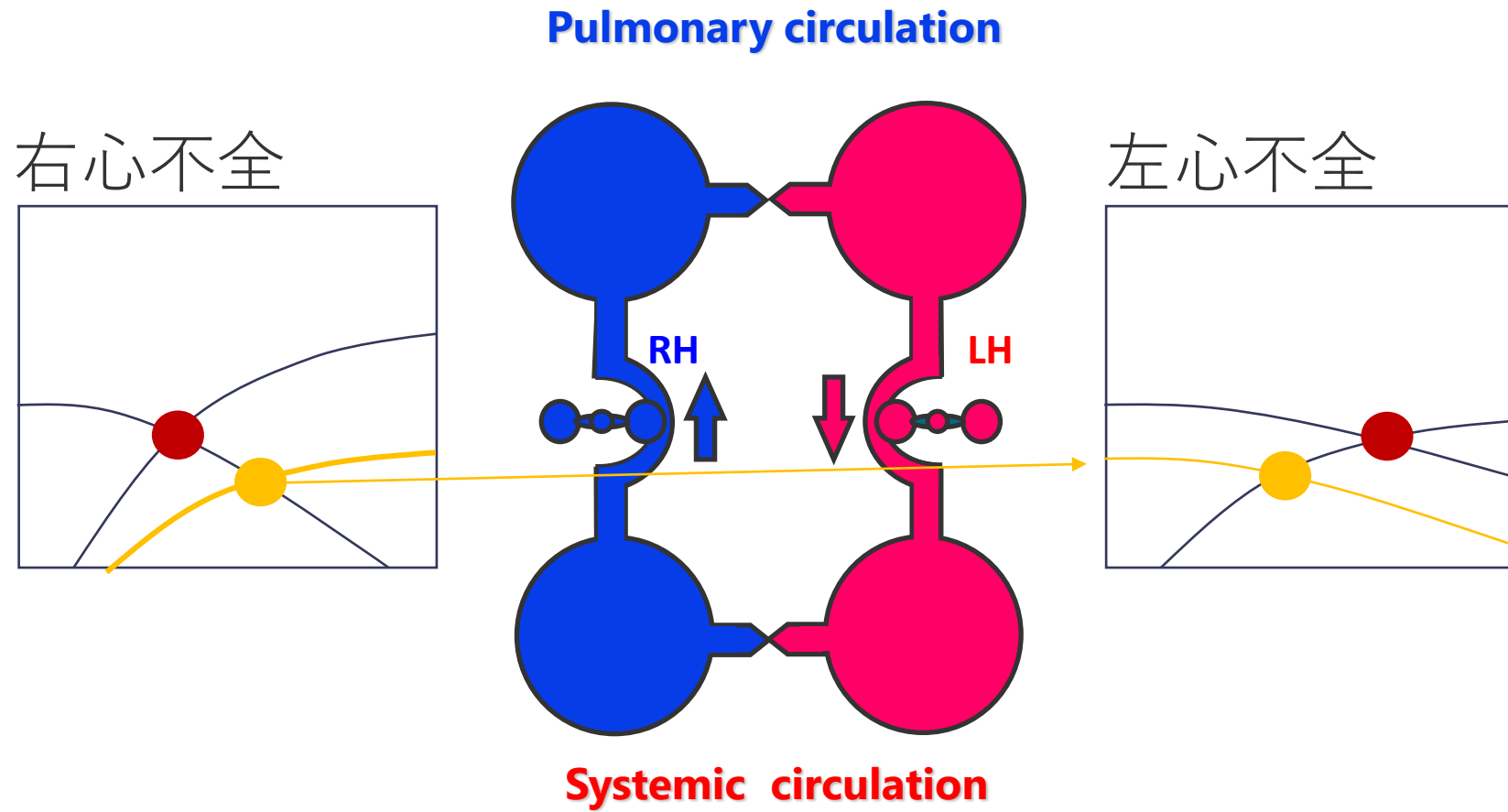
想像ツールとしてはアリ

利尿剤



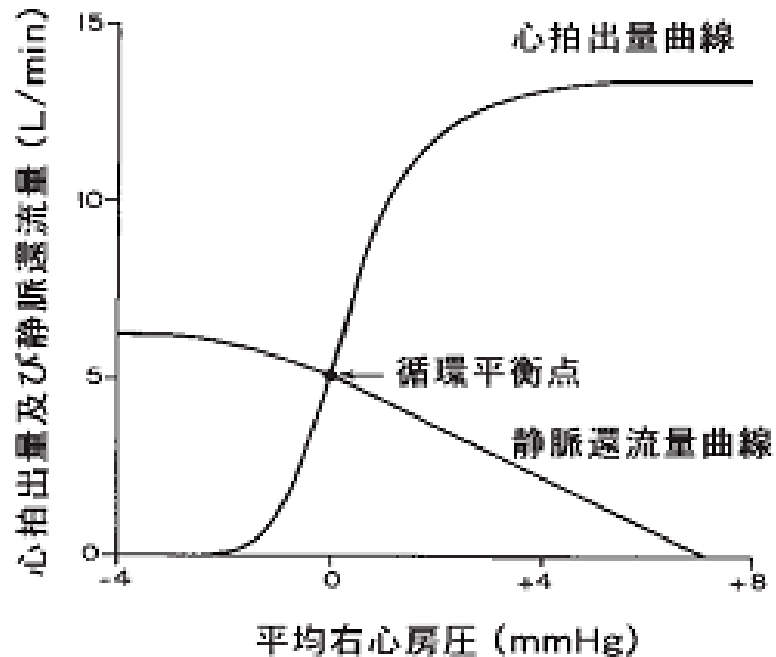
想像ツールとしてはアリ

右心不全



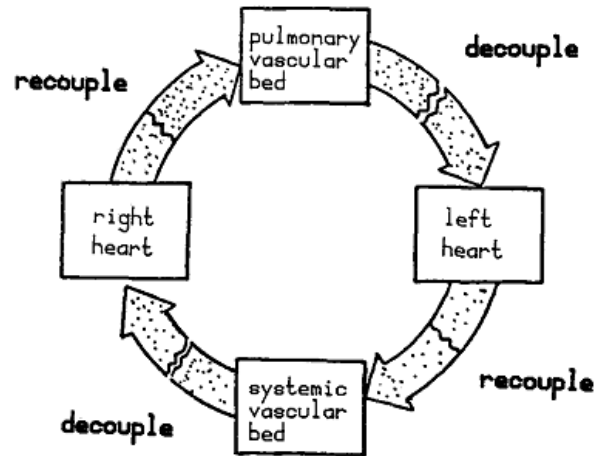
想像ツールとしてはアリ

2心室であることをもっときちんと示す

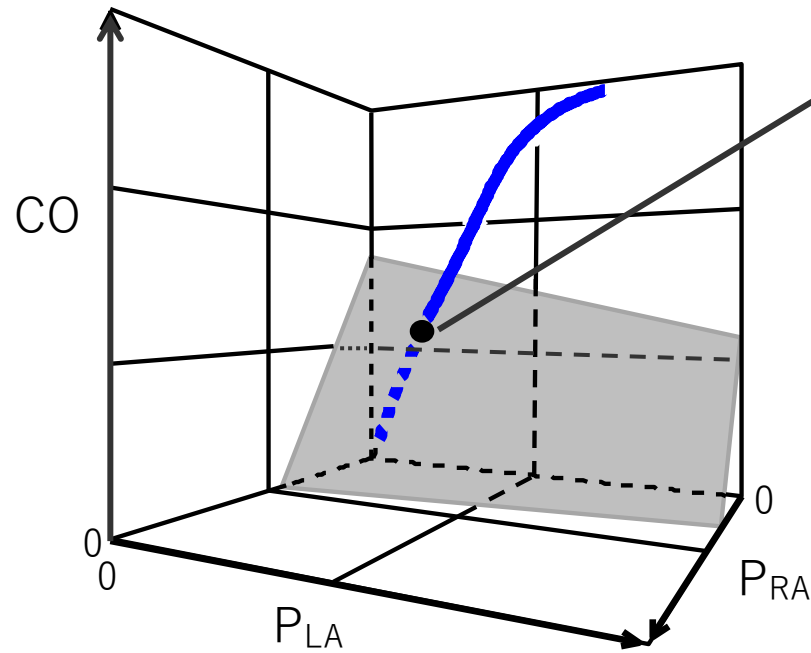


- ガイトン循環平衡は横軸右心房
- 左心房圧の定義ができない
 - 循環の理解が片手落ち
 - 肺うっ血とか左心PV loopとかにまで議論が伸びない
- 定量的な話はできない
 - ざっくりした話にとどまる

一般化循環平衡 (=Extended Guyton/Generalized Circulatory Equilibrium)



循環を体循環/右心/肺循環/左心の4つのコンパートメントにわけモデル化し、再構成する



循環平衡点

左心機能

$$CO_L = S_L \{ \log(P_{LA} - F_L) + H_L \}$$

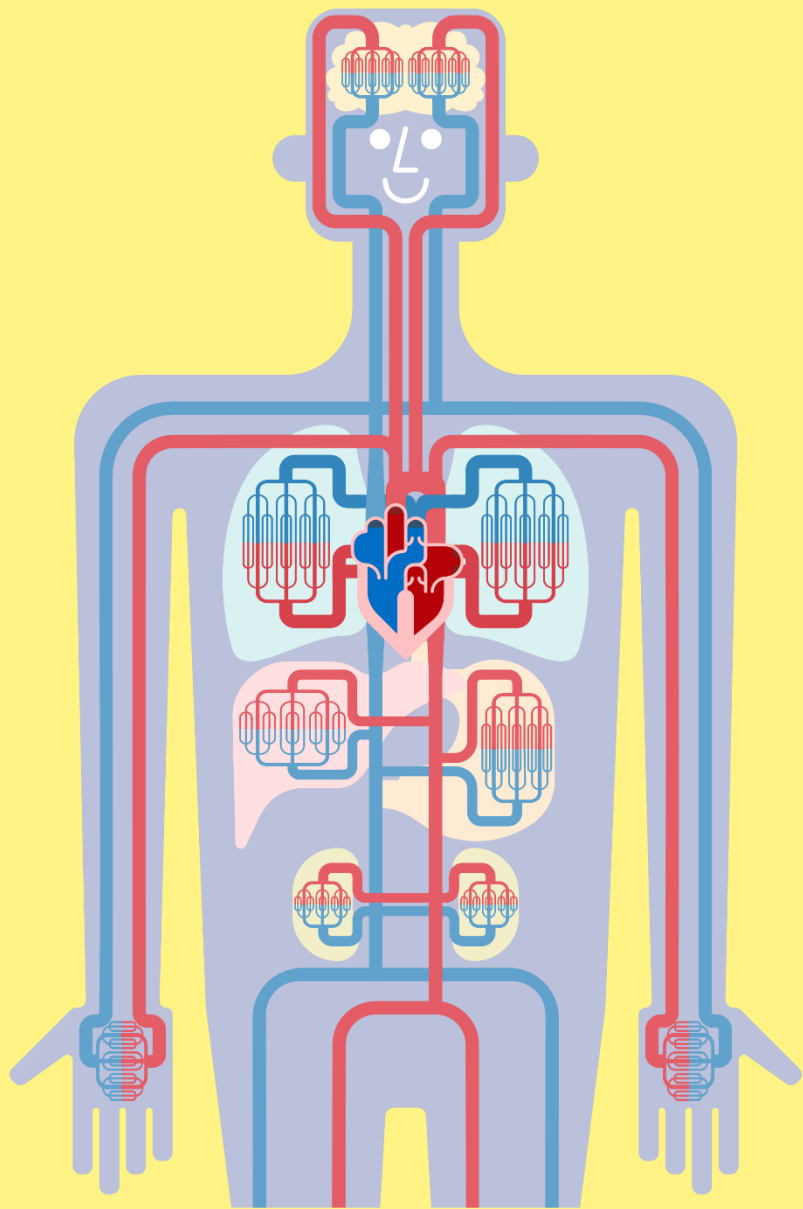
右心機能

$$CO_R = S_R \{ \log(P_{RA} - F_R) + H_R \}$$

静脈還流平面

$$CO_v = VR_{\max} - 19.61P_{RA} - 3.49P_{LA}$$

血行動態の理解とは3連立方程式を作り、それを解くことである！

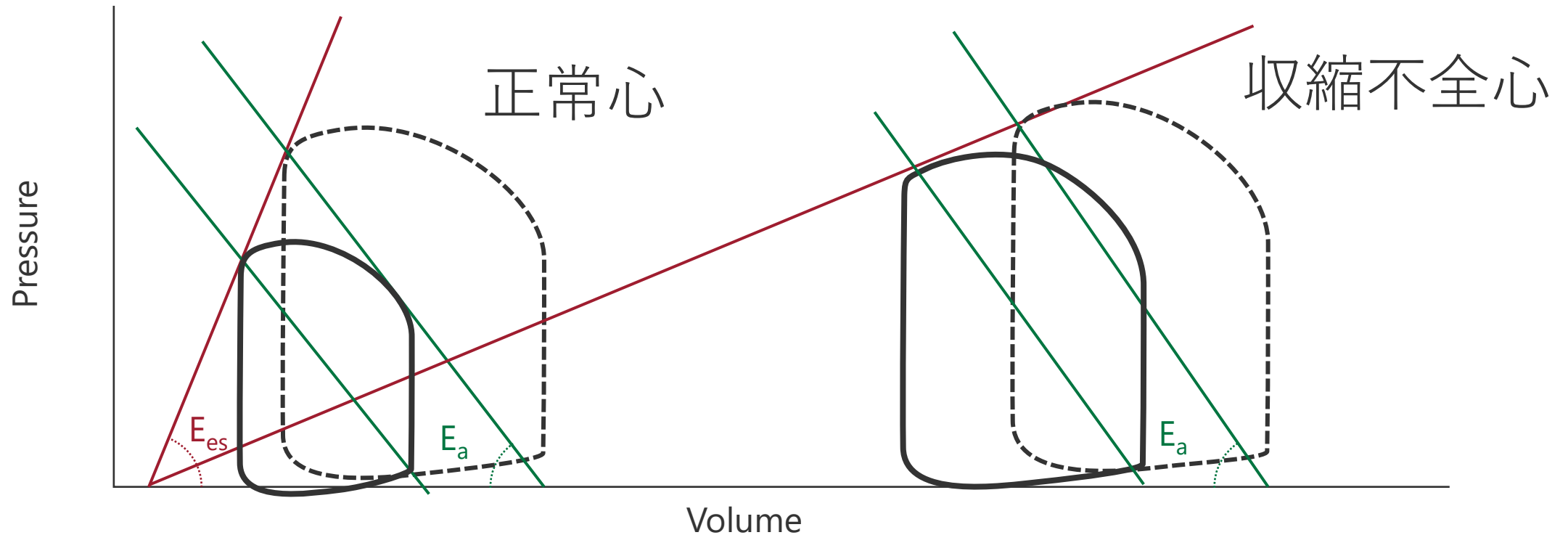


さいごに、 、 、

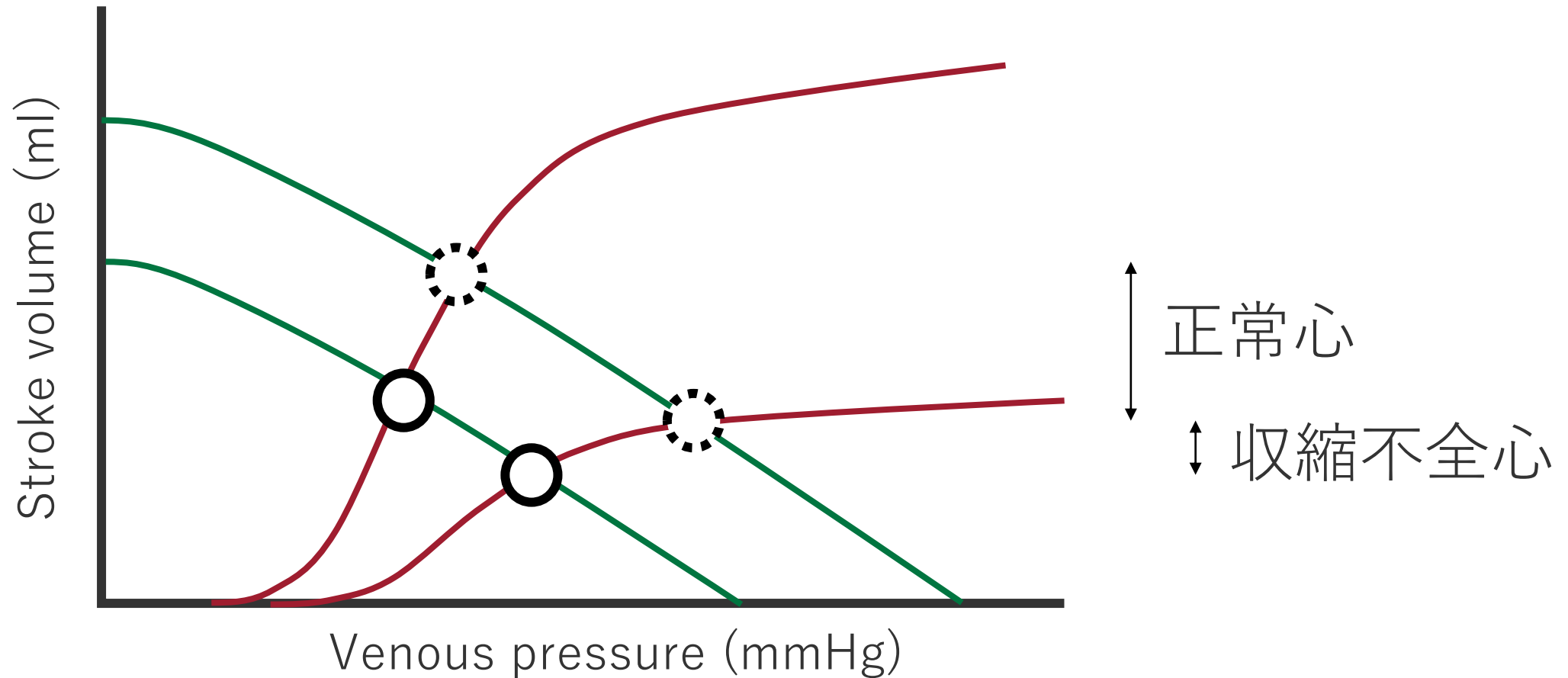
良い心臓の1回心拍出は前負荷依存

$$SV = \frac{E_{es}}{E_{es} + E_a} (EDV - V_0) \rightarrow \begin{array}{l} E_{es} \text{ が大きければ、前負荷でしっかりSVが変化する} \\ E_{es} \text{ が小さければ、前負荷でSVが変化しない} \end{array}$$

正常心ではSVが前負荷で大きく変わる

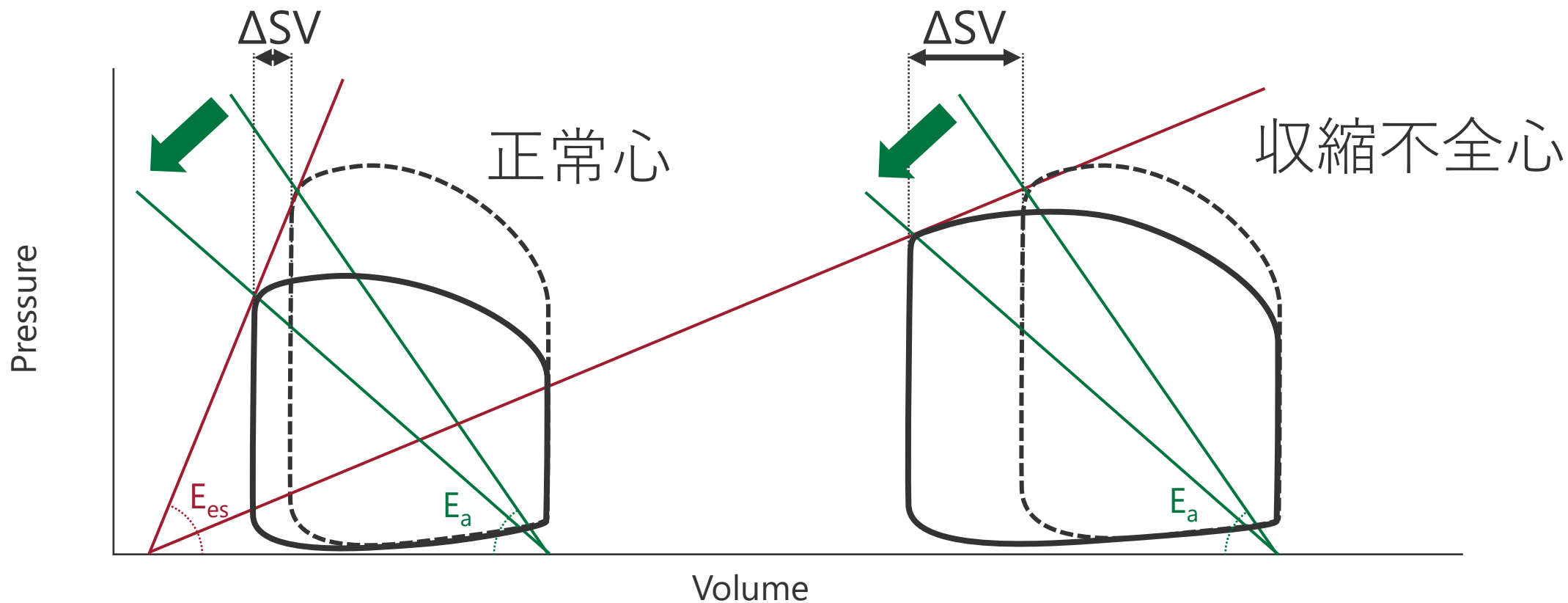


良い心臓の1回心拍出は前負荷依存



悪い心臓の1回心拍出は後負荷依存

$$SV = \frac{E_{es}}{E_{es} + E_a} (EDV - V_0) \rightarrow \begin{array}{l} E_{es} \text{ が大きければ、} E_a \text{ の影響少ない} \\ E_{es} \text{ が小さければ、} E_a \text{ の影響大きい} \end{array}$$



まとめ

良い心臓の1回心拍出は前負荷依存

悪い心臓の1回心拍出は後負荷依存

→これが説明できたらほぼOK