

目指せ!至高の循環動態アセスメント

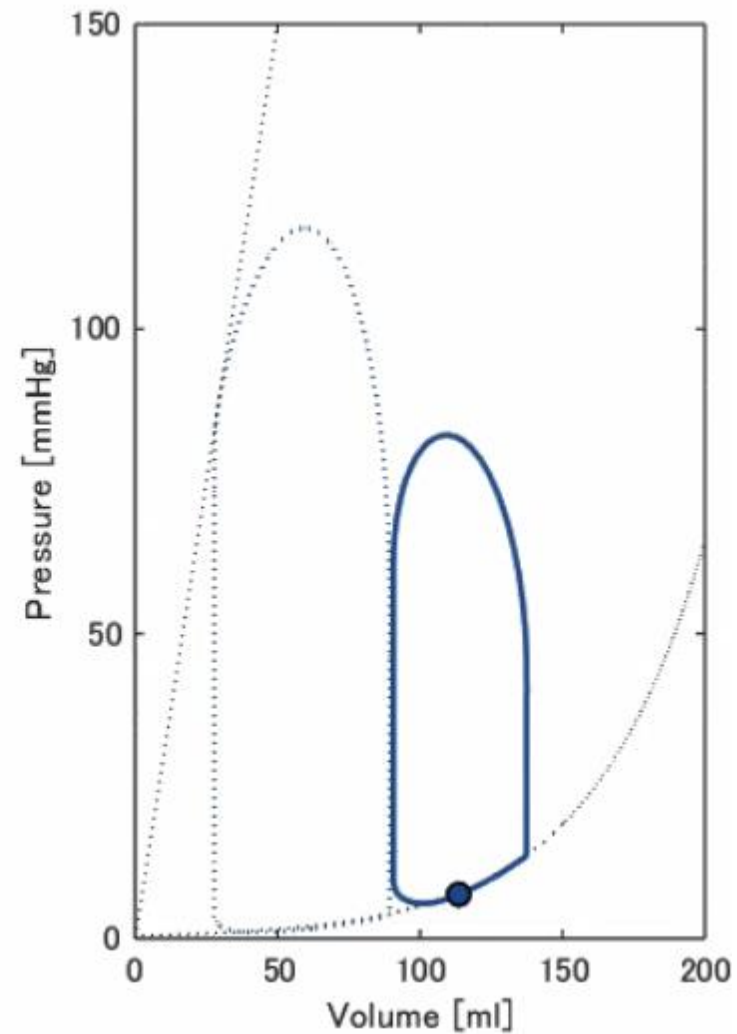
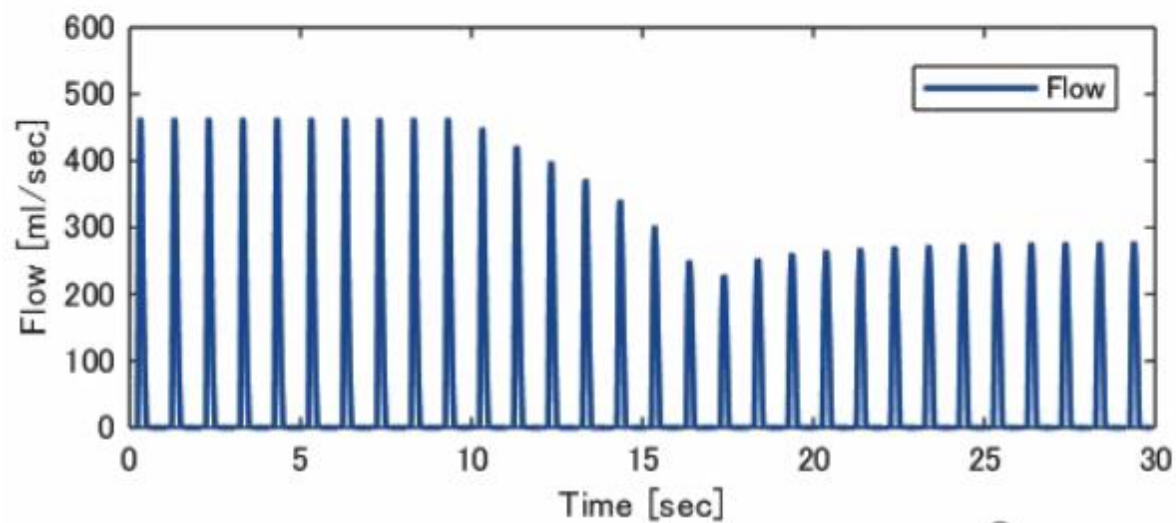
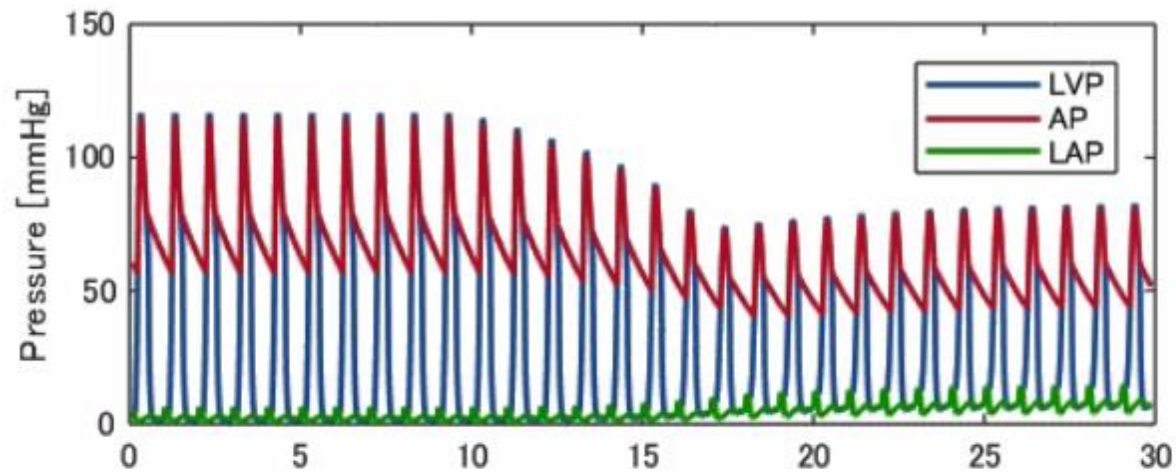
# 循環動態アカデミーBasic サマーキャンプ2020

循環の平衡が意味すること  
～すべてをつなげる絶対法則～

朔 啓太  
国立循環器病研究センター



まずはこちらをご覧ください

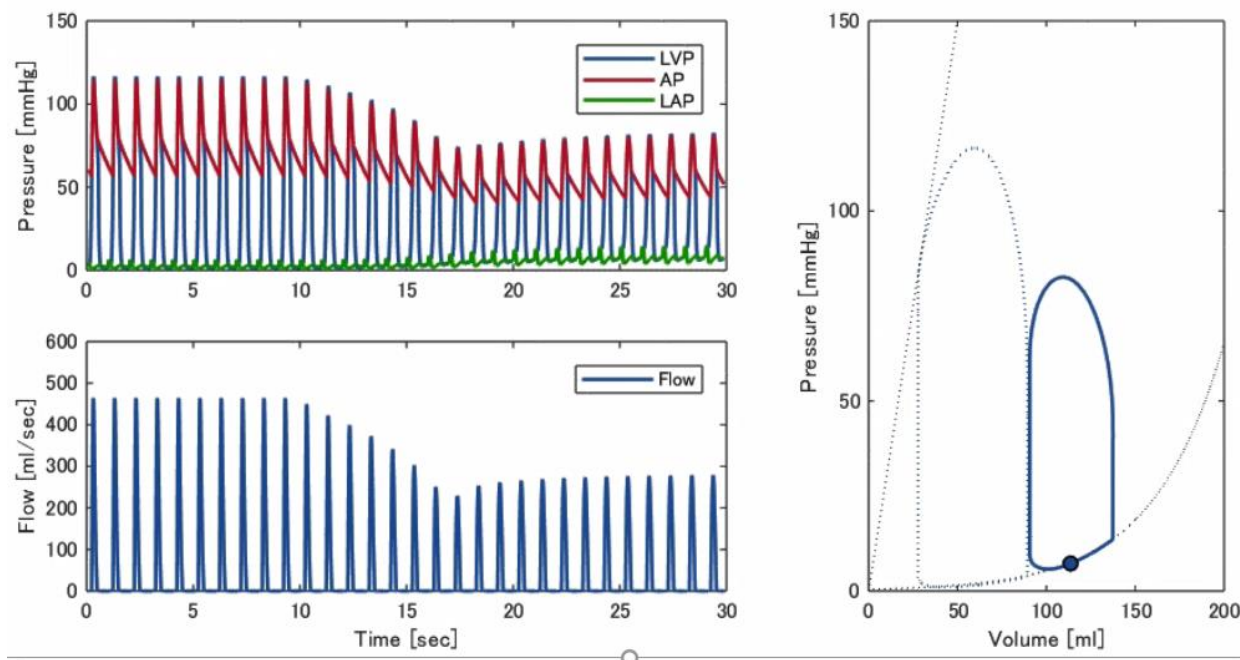


# 問題です

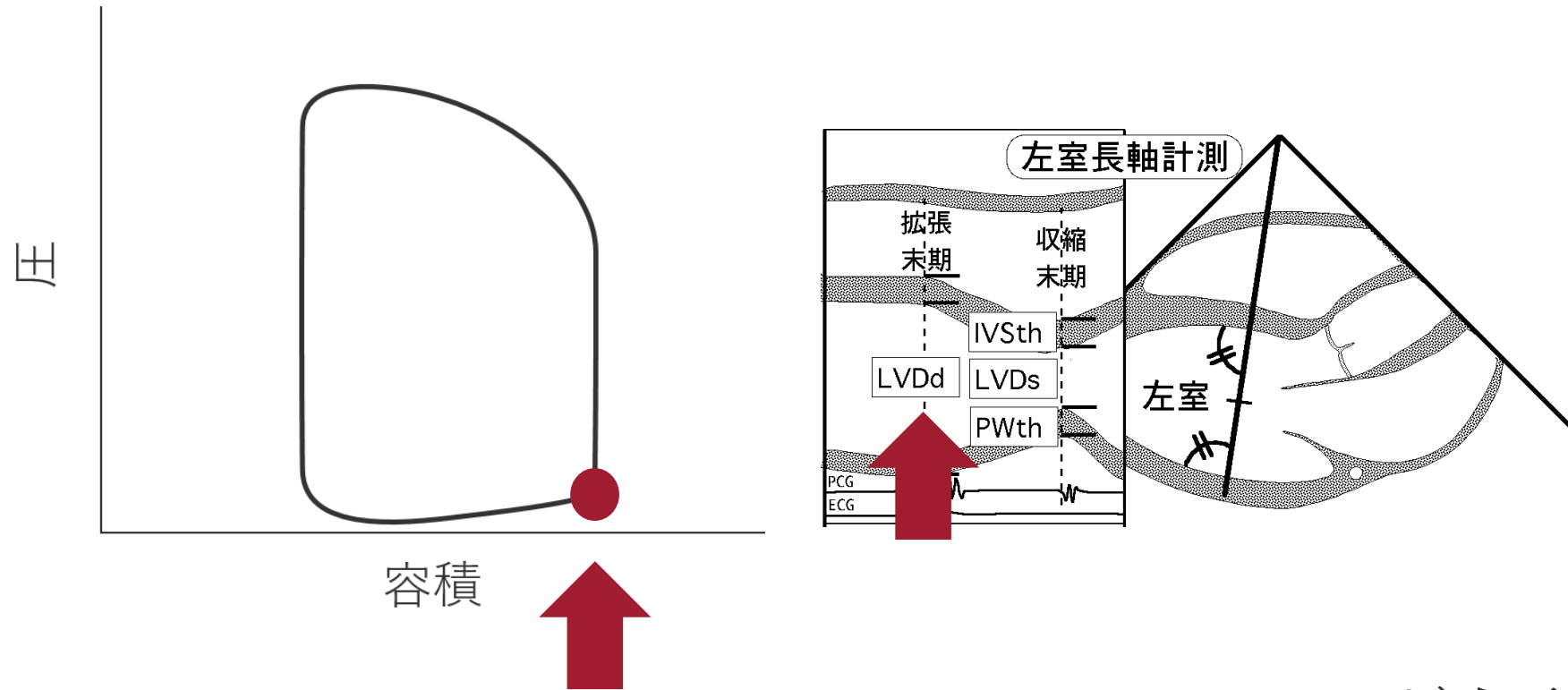
さきほどの動画は、心筋梗塞で急に心収縮能が低下した心臓です。

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？



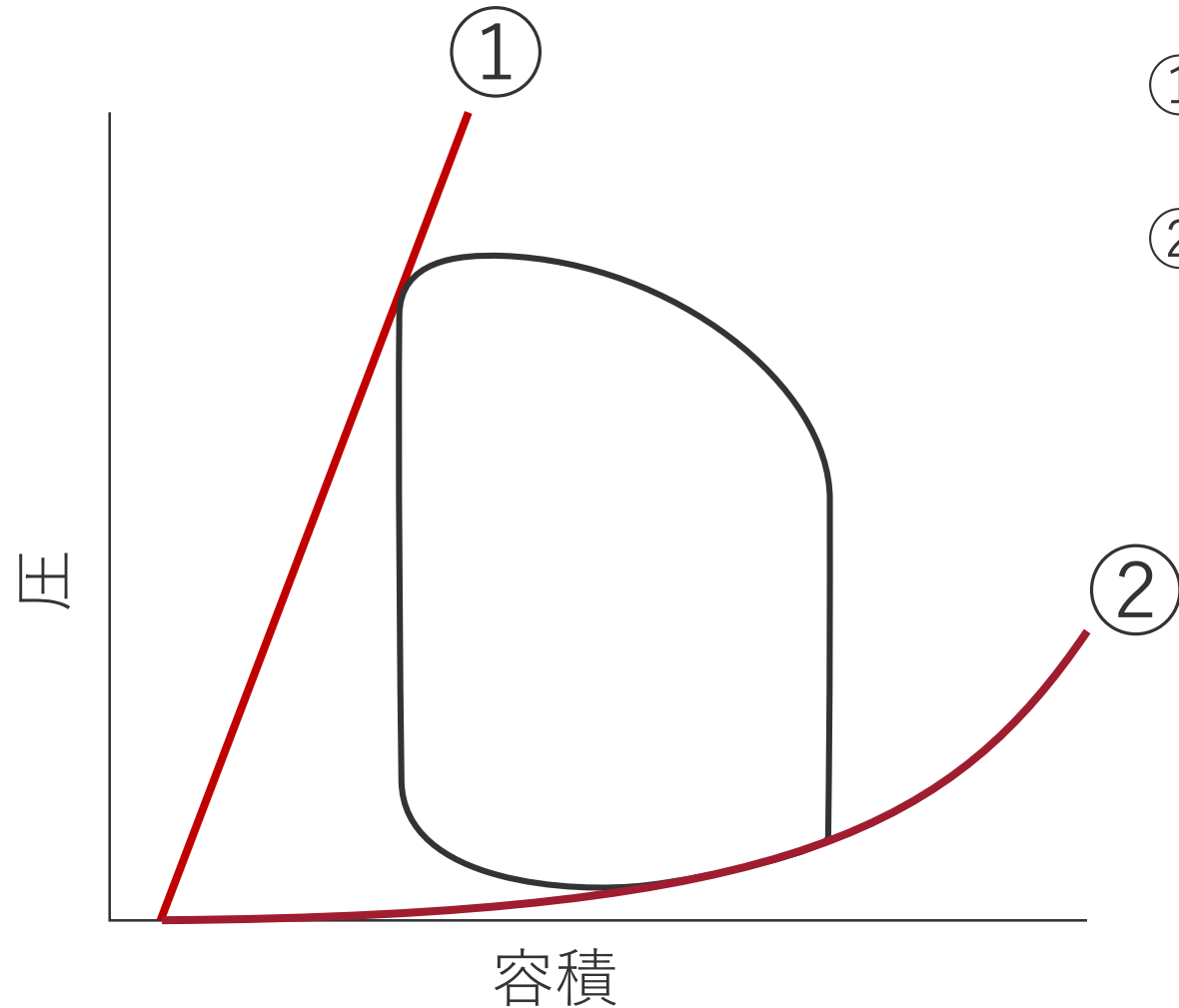
# 心臓の前負荷とは？その決定因子は？



PV loopのここです

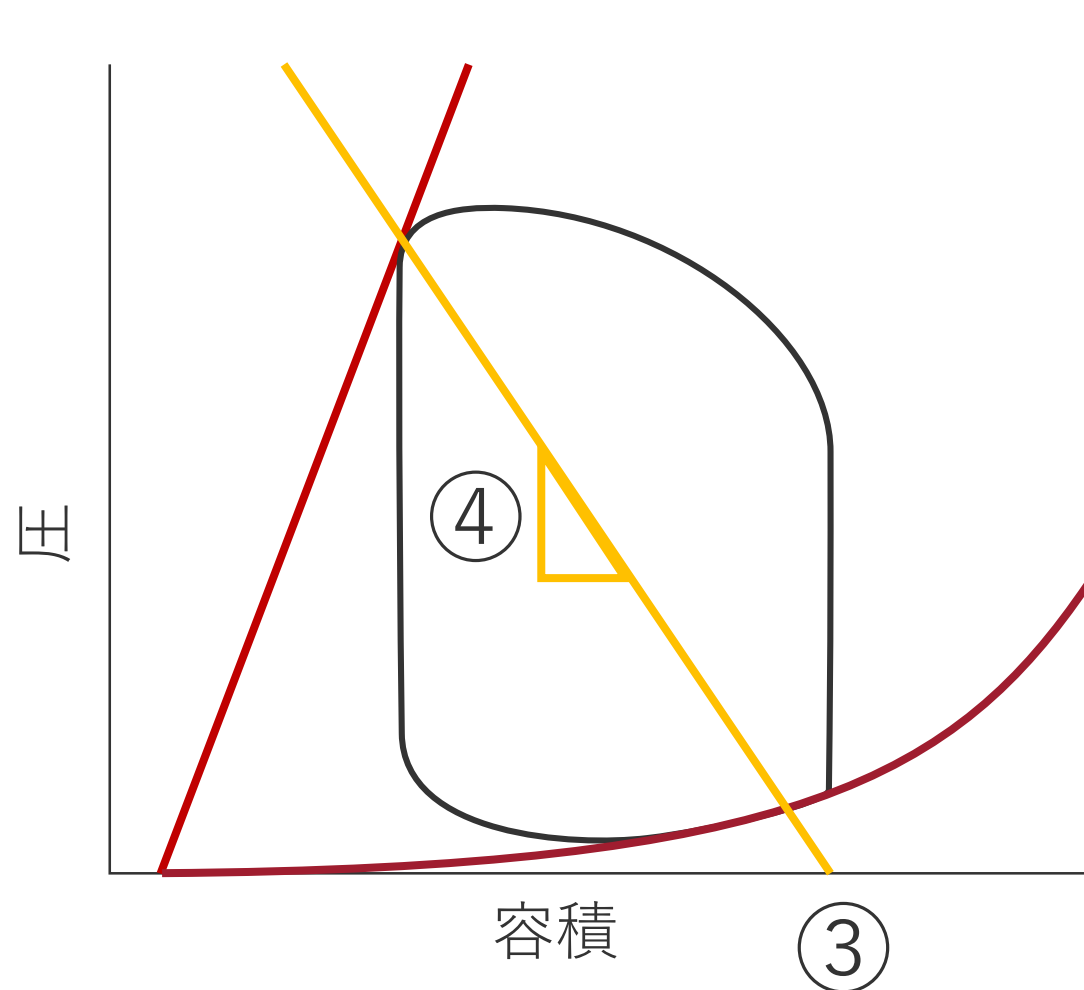
どうやってこの点が  
決まっているのか？

# 心臓機能ガチ勢はPV loopを決定できない

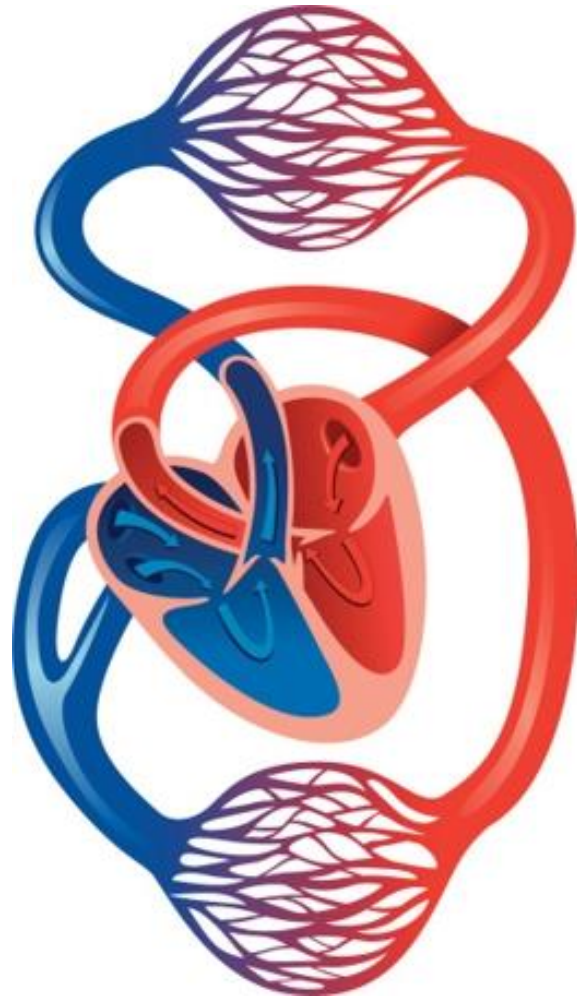
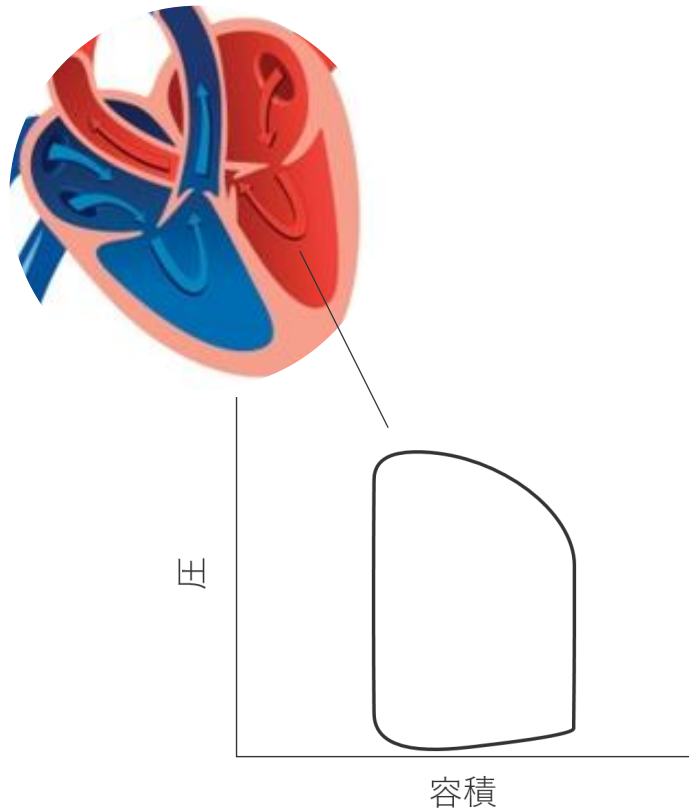


**心機能  
ガチ勢**

# 前負荷と後負荷で一回心拍出は決まる

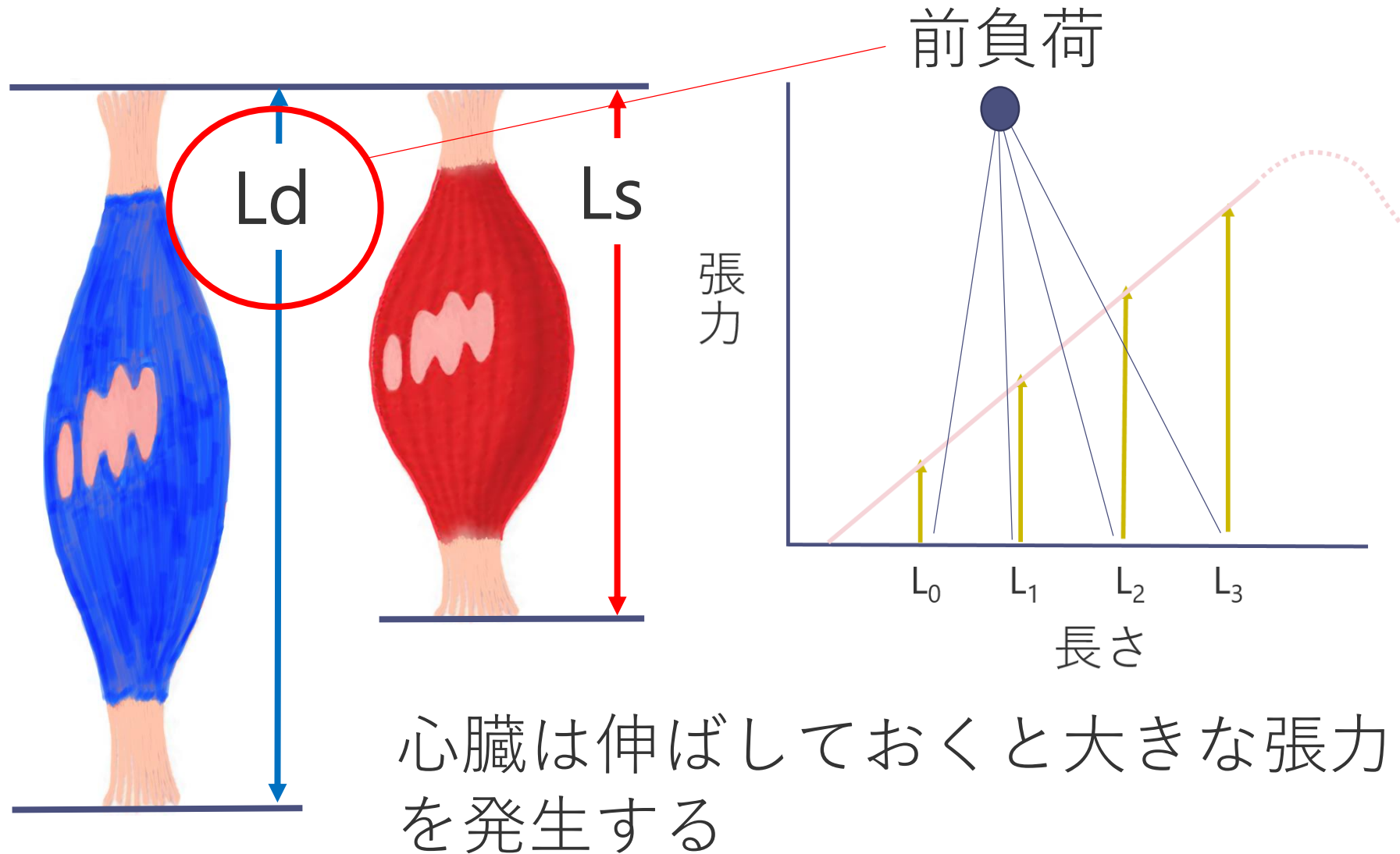


# PV loopは循環動態の理解には不十分



では、どのように循環を表せばよいだろうか？

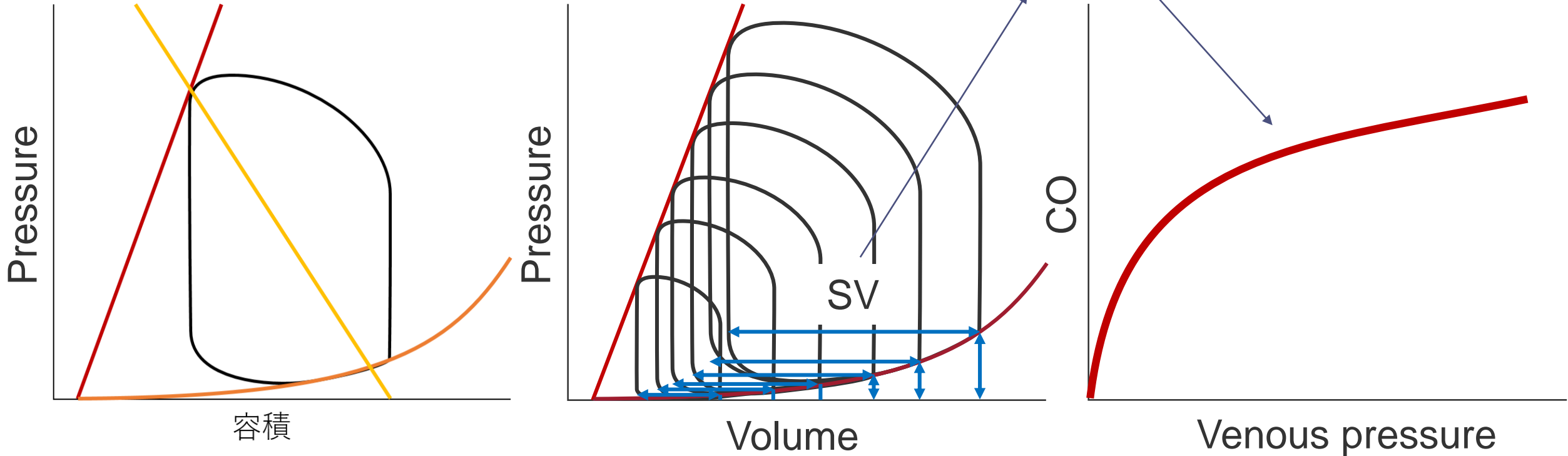
# 前負荷の定義





# 心機能曲線の成り立ち

SVにHRをかけて縦軸としてプロット



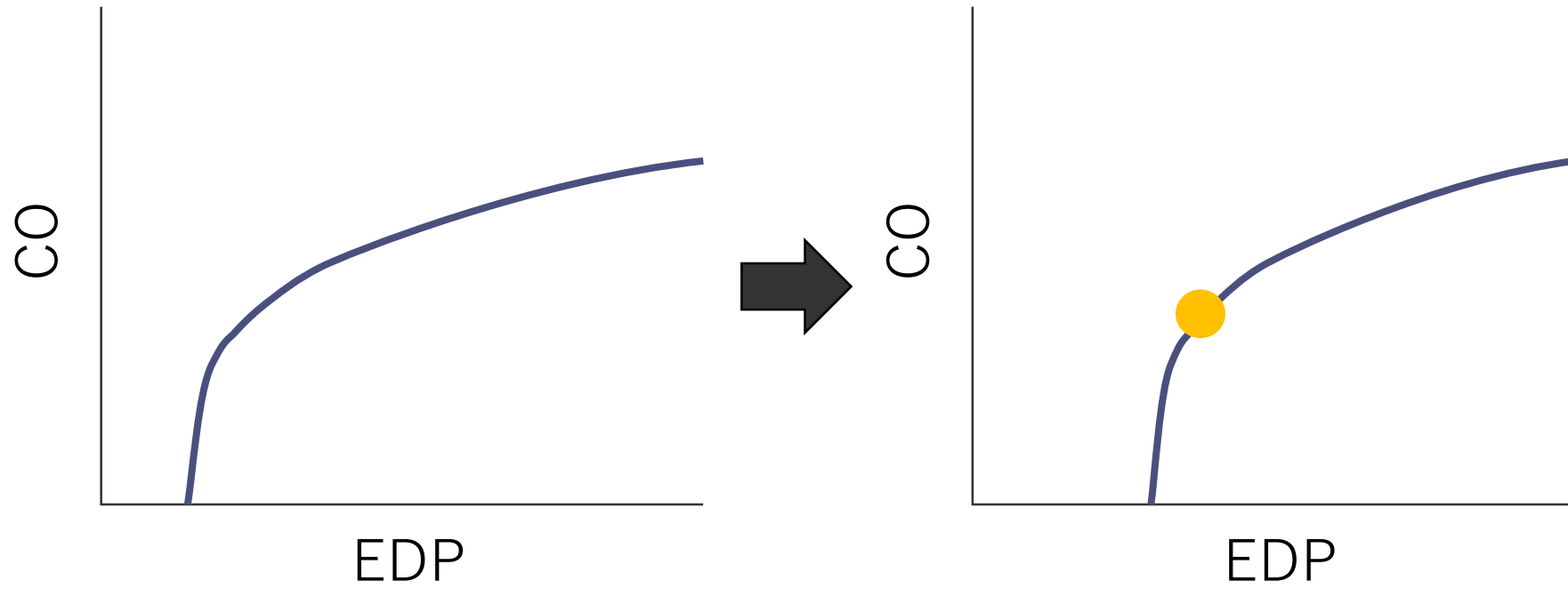
SVはPV loopで定義される

= 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。 ※後負荷は心拍数で決まる

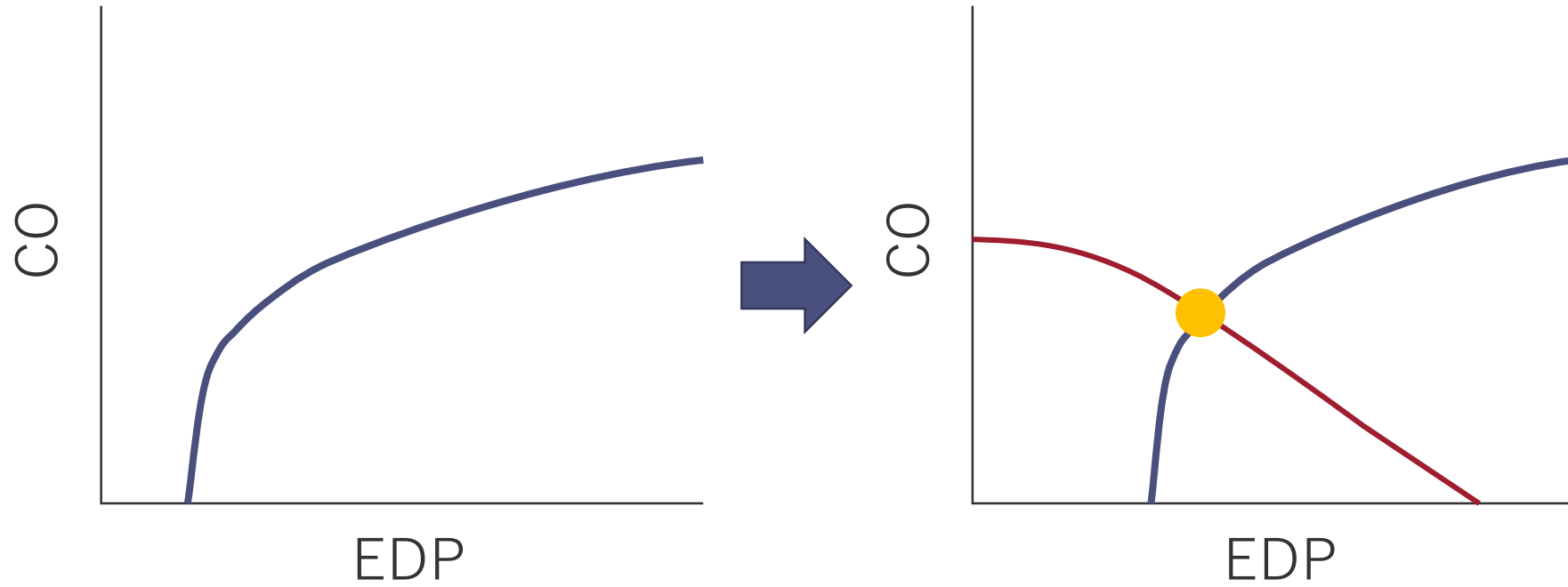
# 循環動態

---



# 赤い線が見えることが大事

---



# 余談

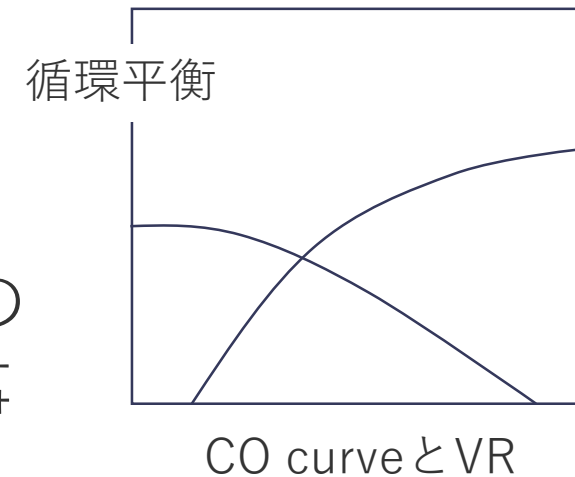
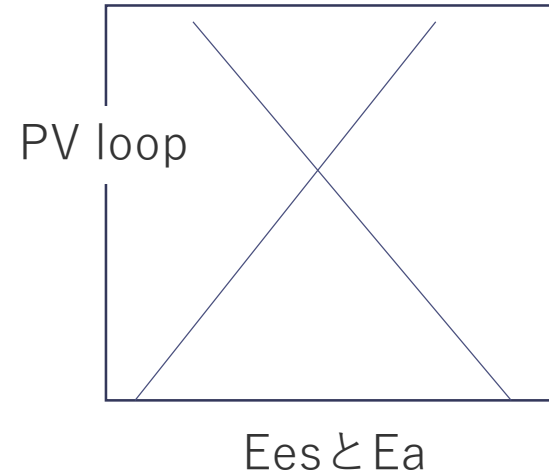
---





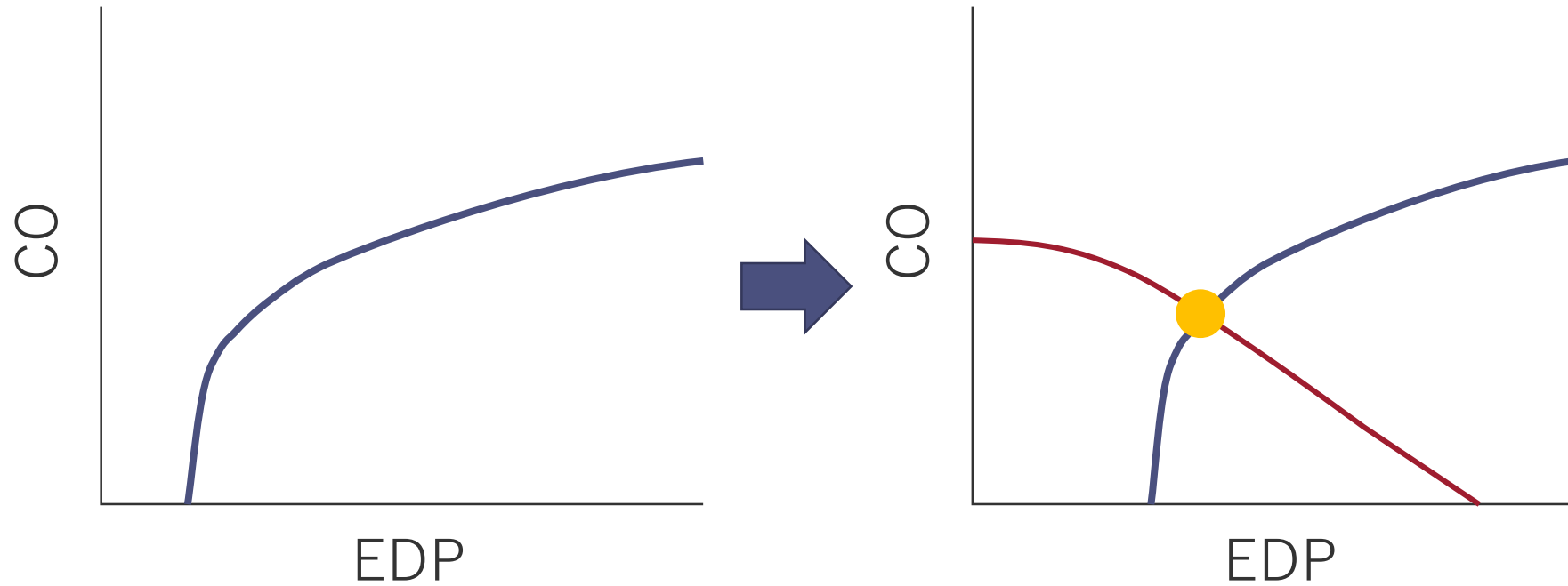
# 余談

こんなポーズしてたら大体わかってる人



PV loopも循環も何かと何かの  
平衡点なんだという理解は大事

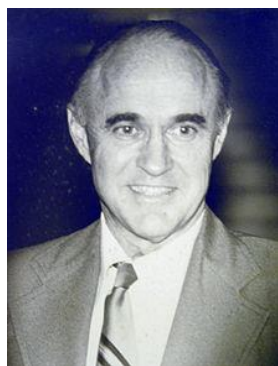
# 赤い線 = 静脈還流曲線



# 静脈還流曲線を知る

---

Arthur Guyton (1919-2003)



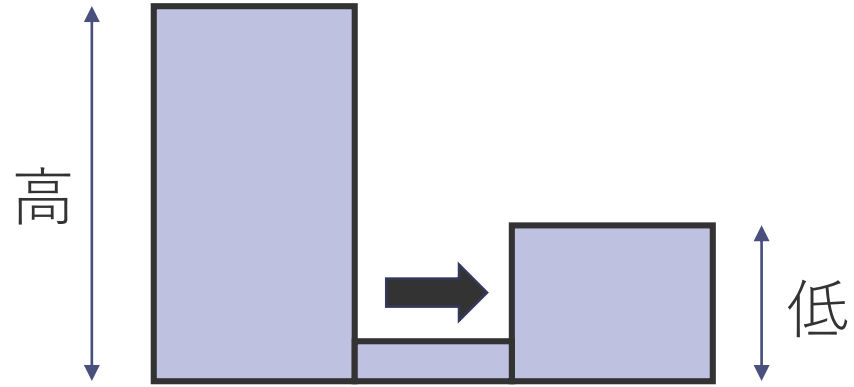
心臓はもどってくる以上  
に拍出できない



どんな戻り方をしてい  
るのか？

# 圧較差で血液は流れる

---

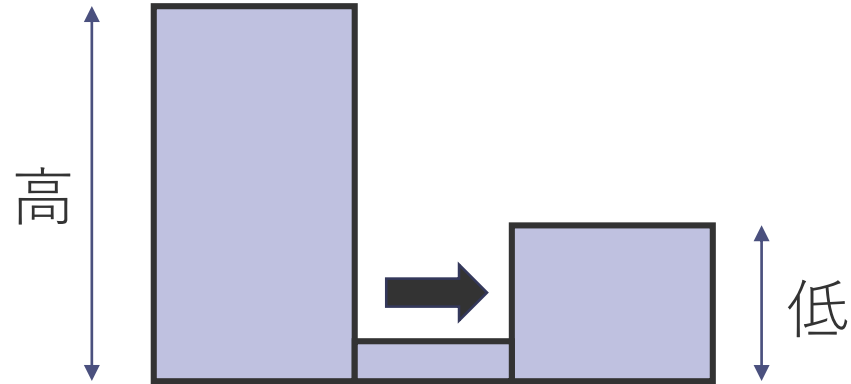


高い圧から低い圧に  
水は流れる

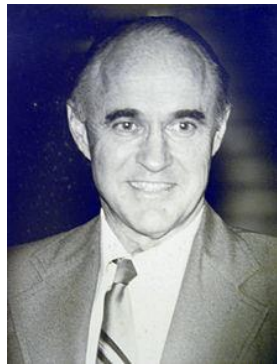


# 圧較差で血液は流れる

---

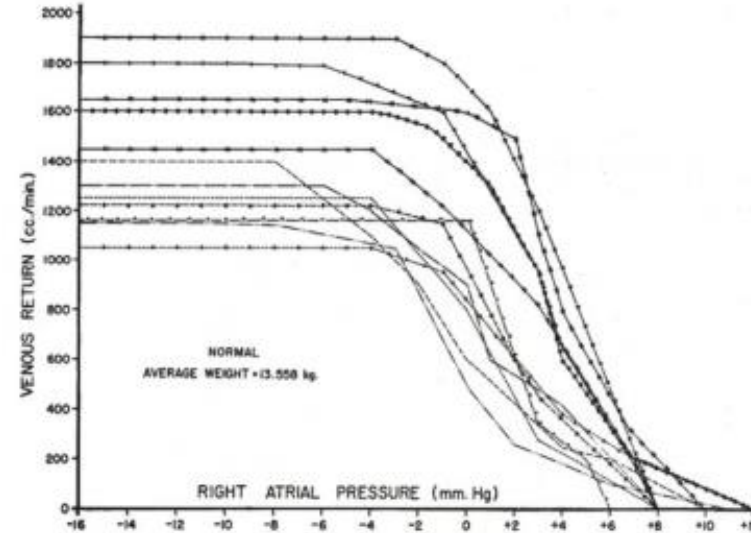
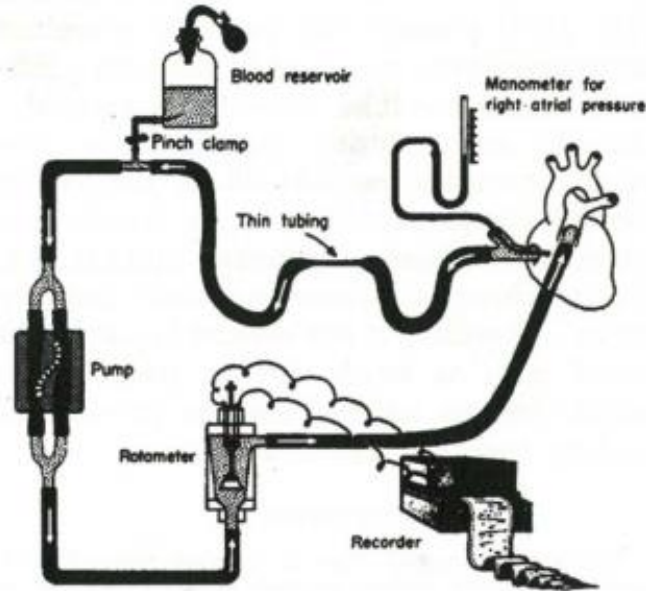


高い圧から低い圧に  
水は流れる



中心静脈圧が高いと  
血がかえって来ない  
のではないか？

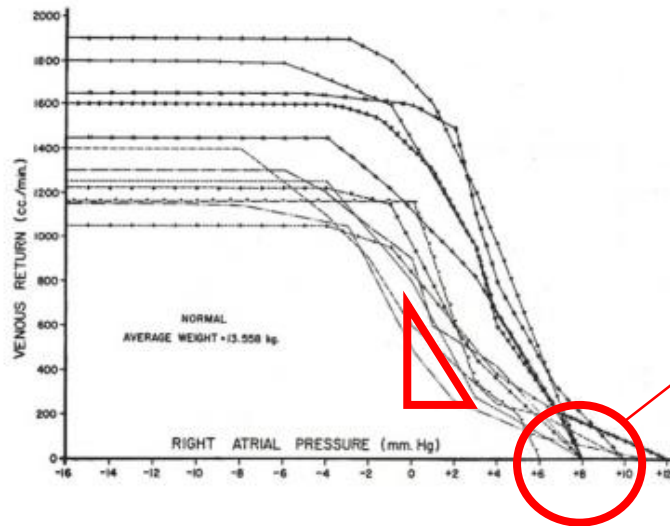
# ガイトンの実験



中心静脈圧（この実験ではRAP）を瞬時に変化できる実験系

中心静脈圧がある値になると静脈還流がなくなり、それより下がると増え始める→**静脈還流曲線**

# 平均循環充満圧

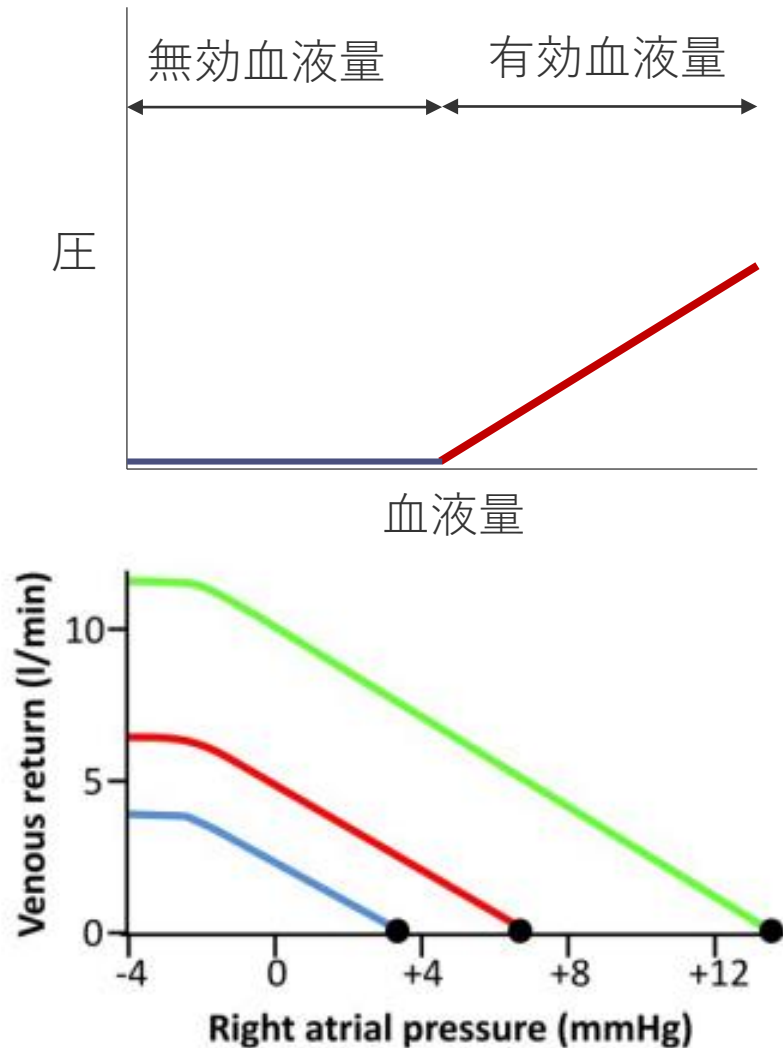


静脈還流ゼロの圧  
= 平均循環充満圧  
= 循環が停止し、一定  
になった場合の圧

平均循環充満圧より中心静脈圧がどの程度低いかで  
静脈還流量が決まる

$$\text{静脈還流} = \frac{\text{平均循環充満圧} - \text{中心静脈圧}}{\text{曲線の傾き (静脈還流抵抗)}}$$

# 平均循環充満圧を作るもの（血液量）



圧発生に関わる血液量と関係のない血液量がある



平均循環充満圧は有効循環血液量で決まる



輸液をすると平均循環充満圧が増加し、静脈還流曲線が平行に上方へ、脱血をすると平行に下方へ



# バスタブモデル

## 循環管理に必要な静脈還流の知識

東北医科薬科大学病院麻酔科\*

長屋 慶, 伊藤 洋介, 吉田 明子

<https://doi.org/10.11478/jscva.2018-1-007>

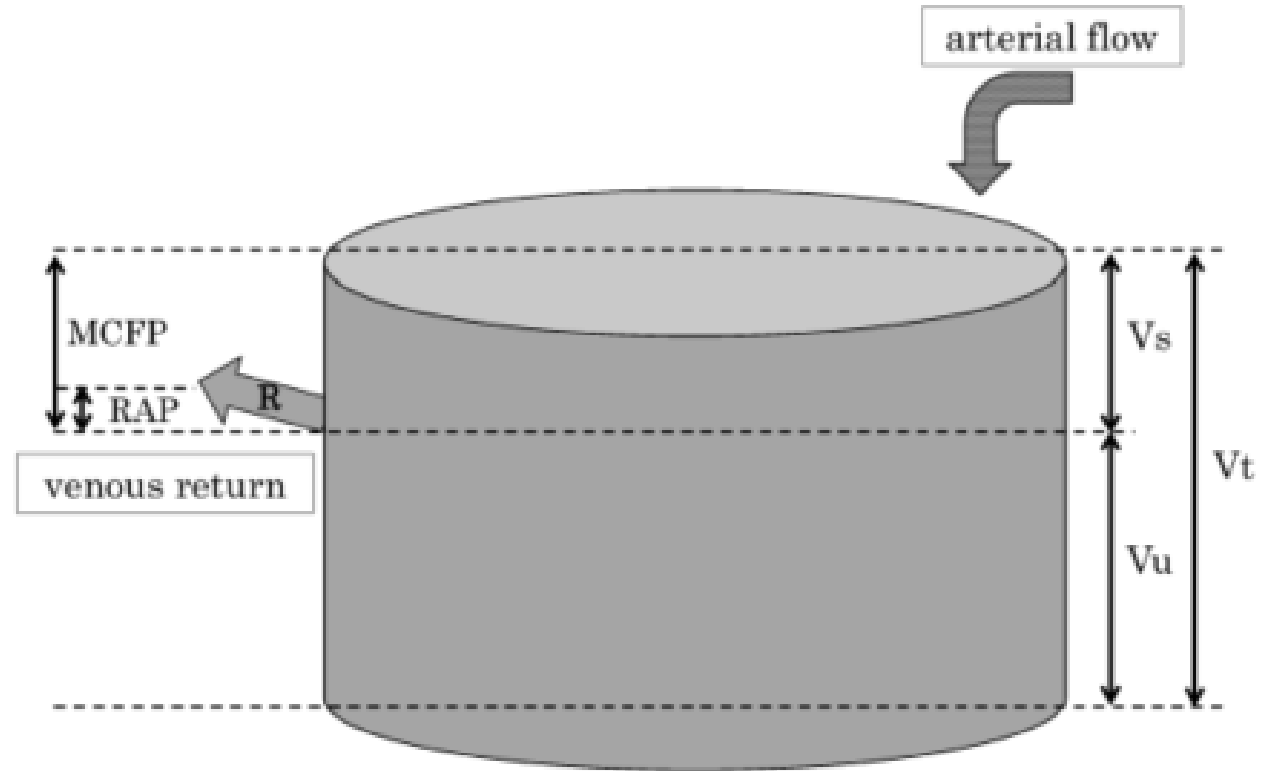
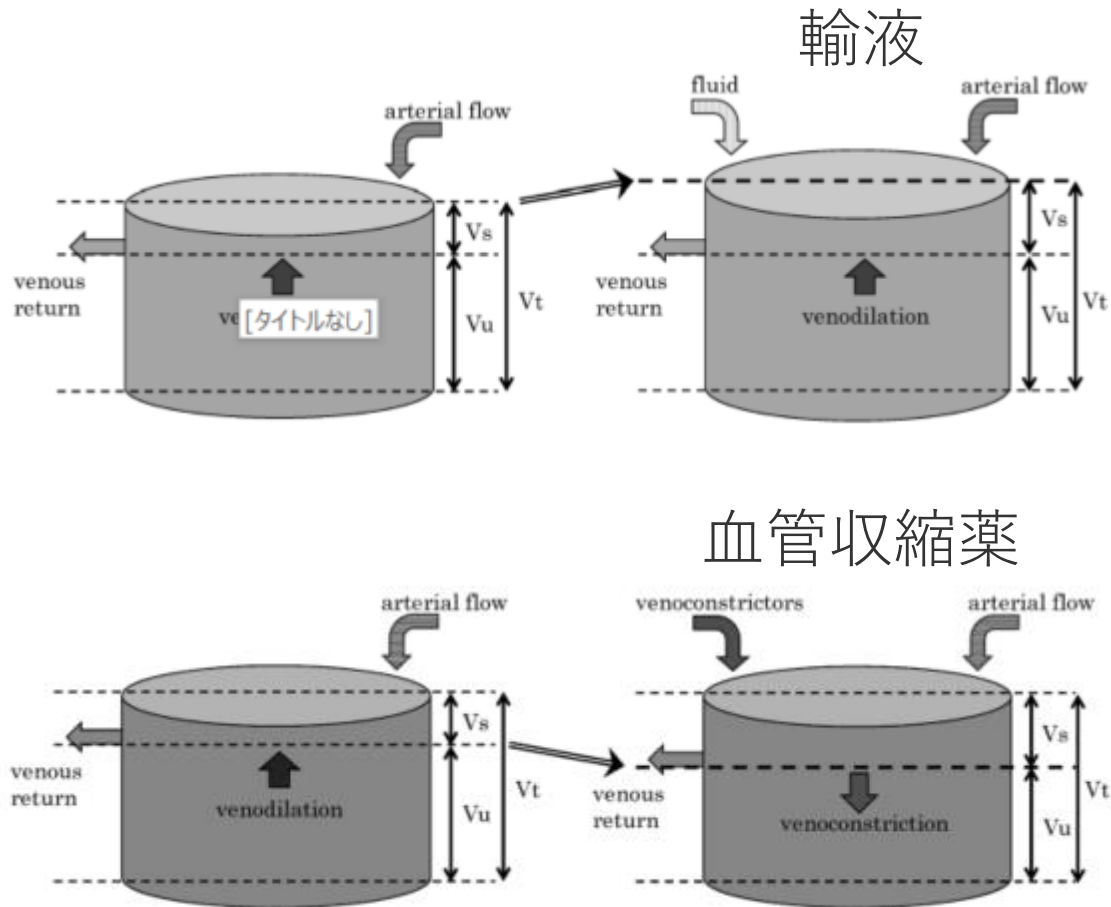


図 6 Bathtub analog  
RAP : Right atrial pressure, R : 静脈還流抵抗  
文献 5 より改変引用。

# バスタブモデルで考えると

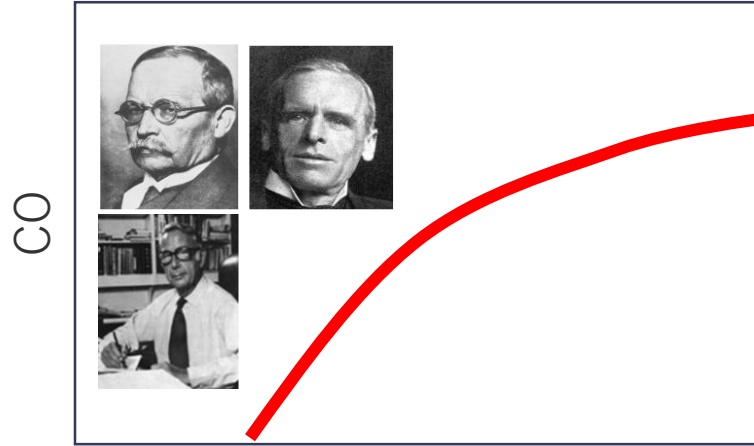


- 一般には総血液量の 1/4 程度が有効血液量
- 体重 1 kg あたりの血管コンプライアンスは 2.72 mL/mmHg
- 平均循環充満圧を 7 mmHg とすると、有効血液量は  $2.72 \times 7 \approx 20$  mL/kg 程度
- 交感神経緊張で 9 mL/kg 近くの有効循環血液量を増加させることができる

→ペットボトル1本分の血が一気に動く

図10 Bathtub analog: 麻酔後と血管収縮薬投与  
静脈が収縮し、排水口が下に移動する。Vu が減少、その分 Vs が増加して静脈還流も増加する。Vt は変化しない。

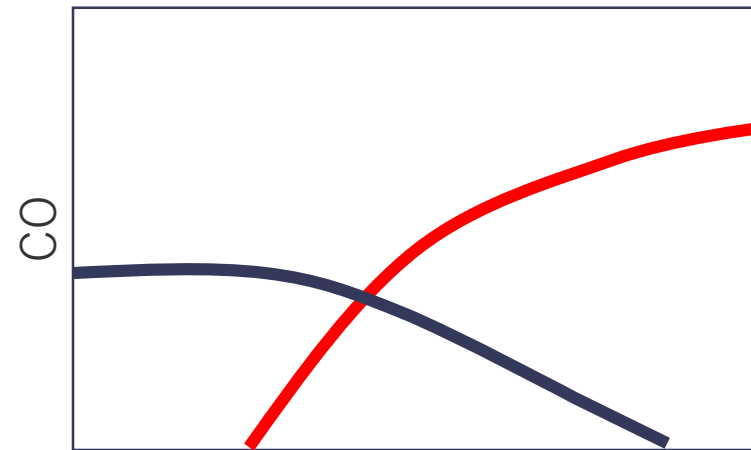
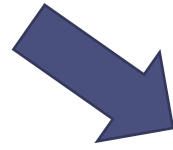
# 合体 = 循環平衡



RAP

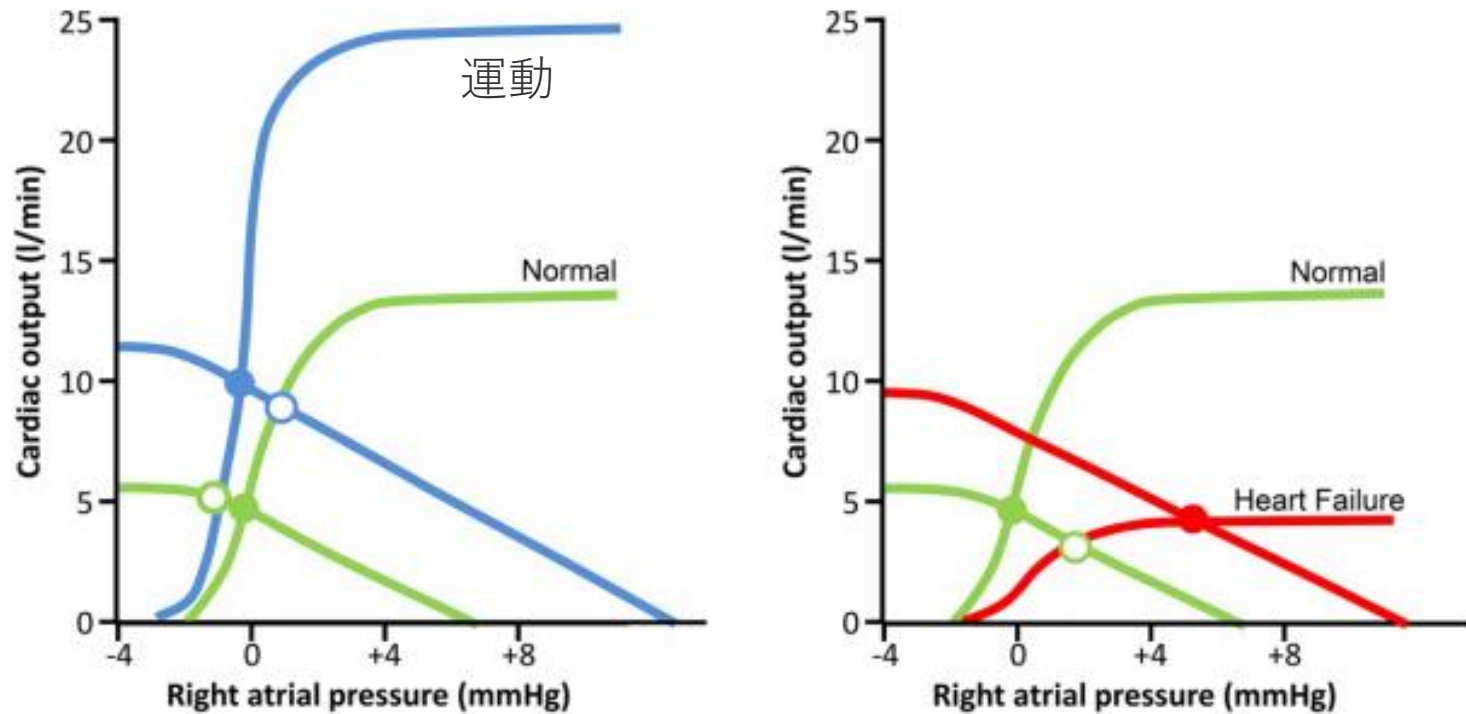


RAP



RAP

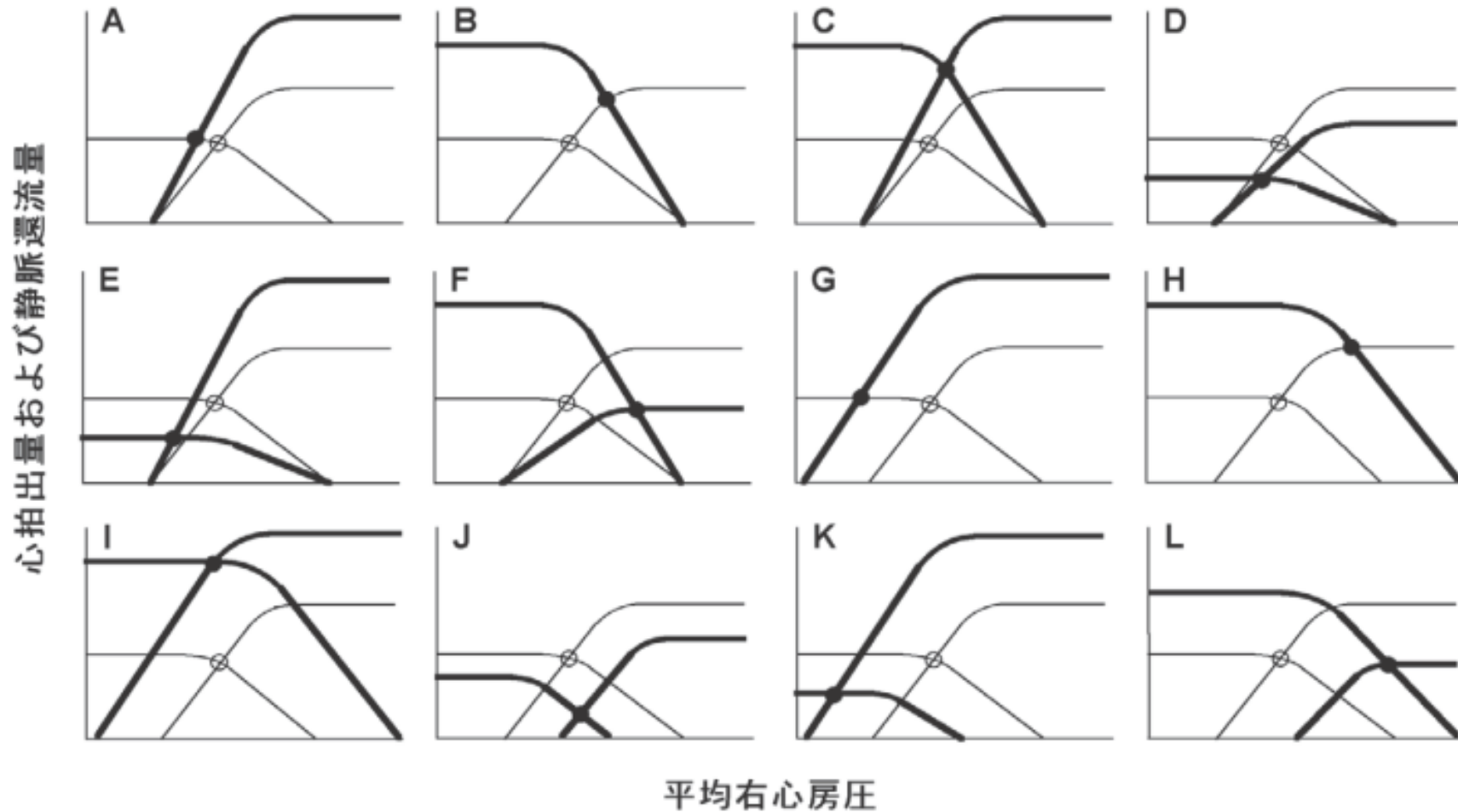
# 循環平衡で前負荷が決まる



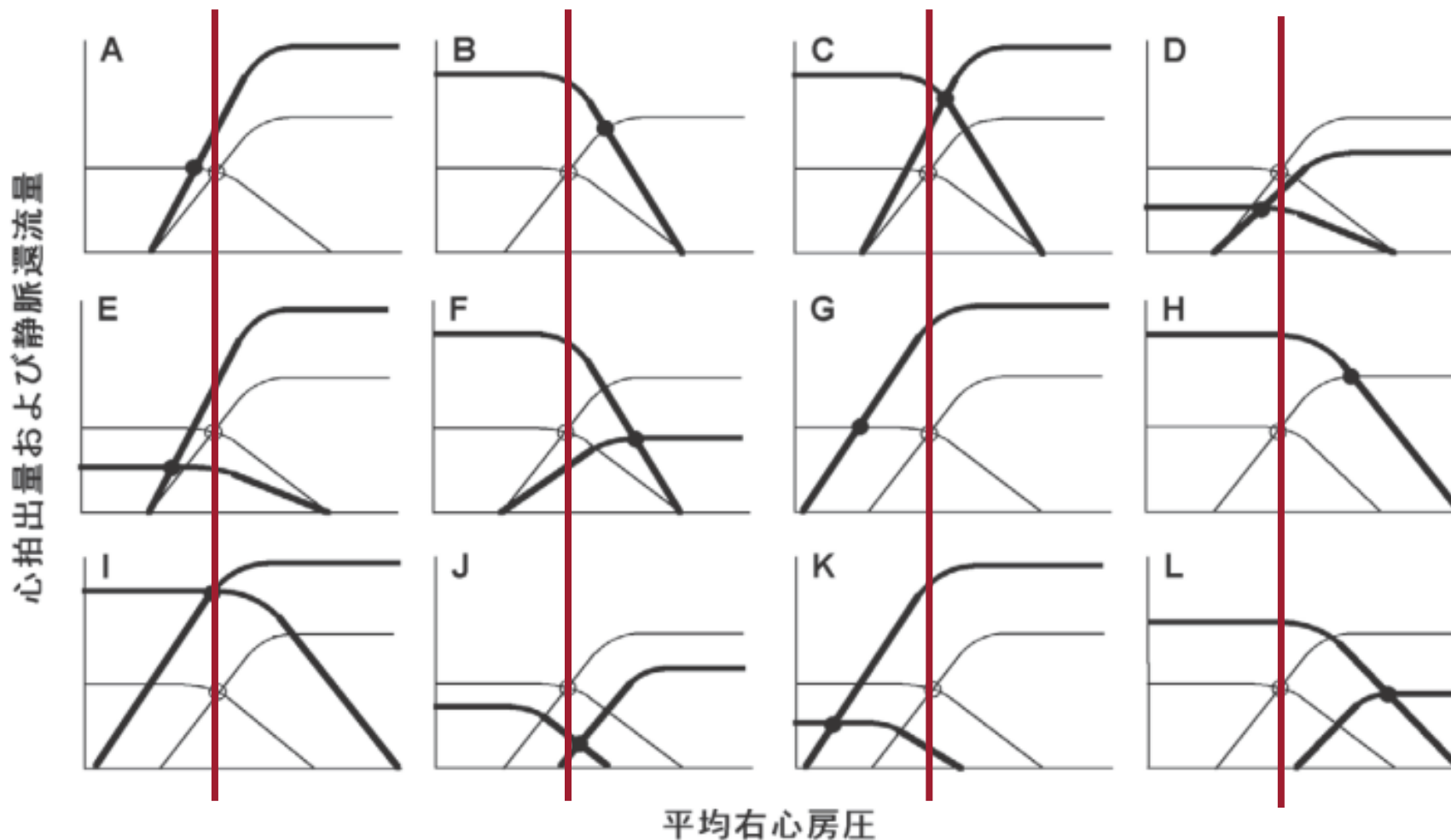
美しくシンプルに正常/病態が記述  
→ガイドン最強説



# 患者はどのパターンか？

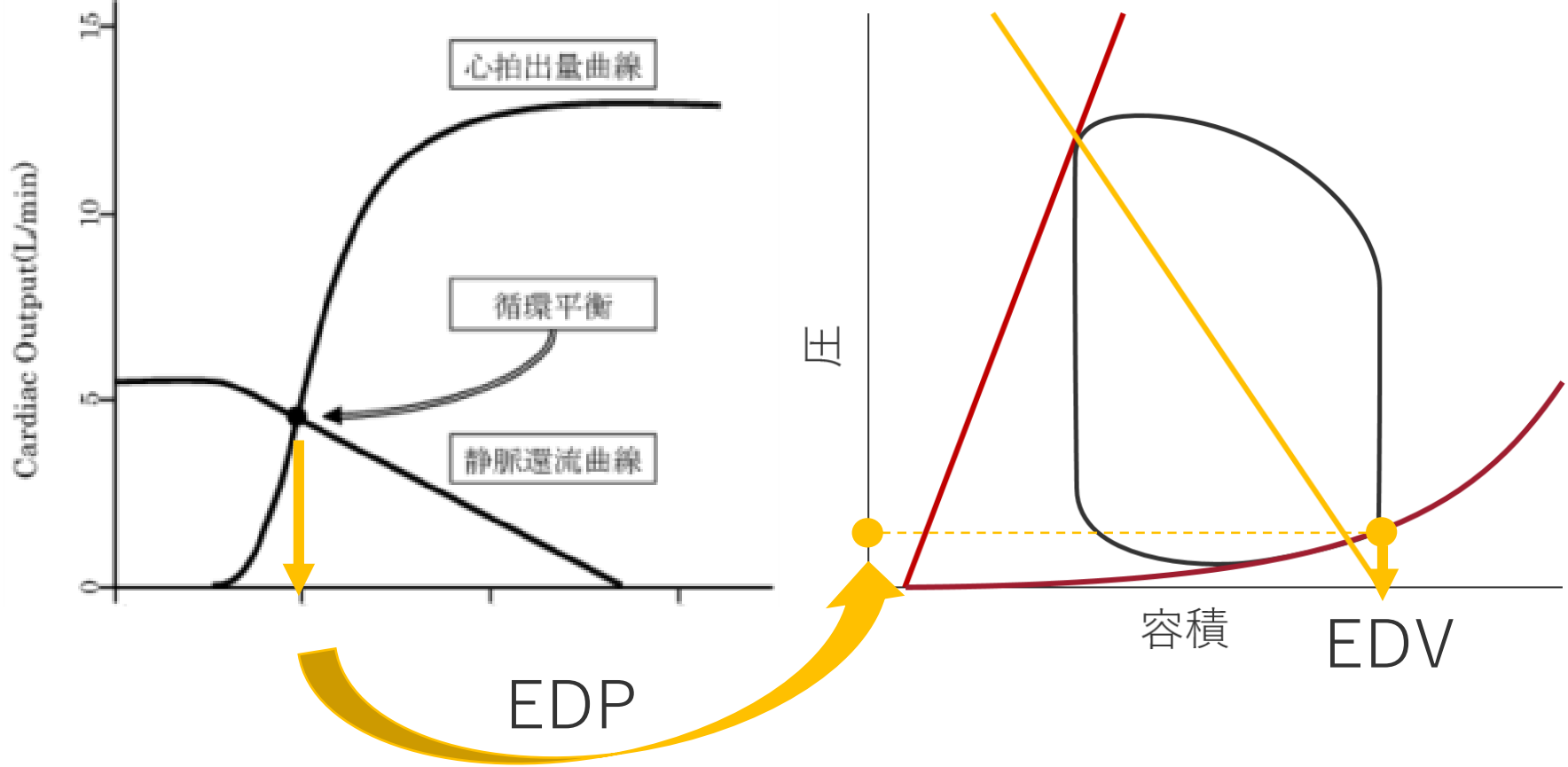


# さまざまなパターンがあり得る

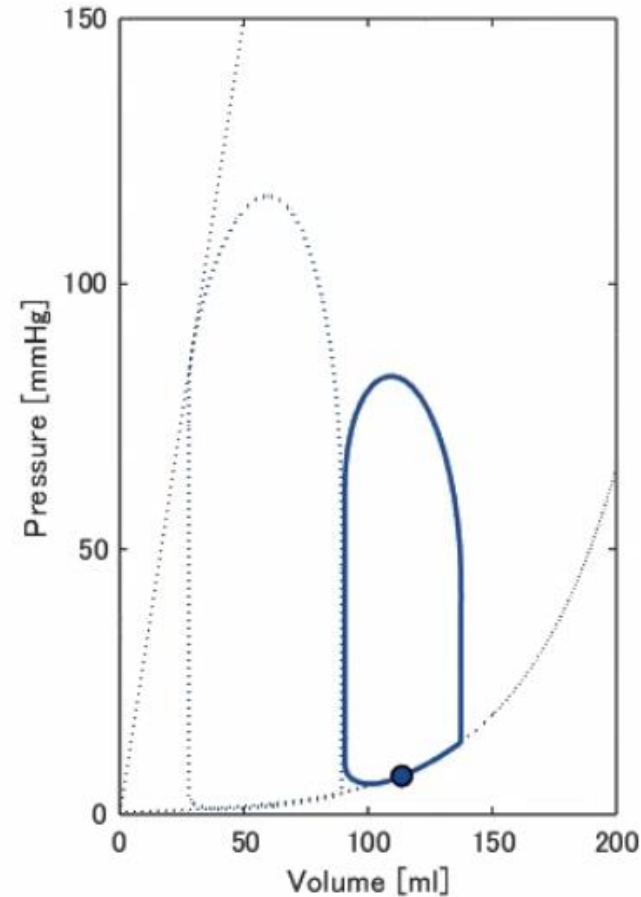
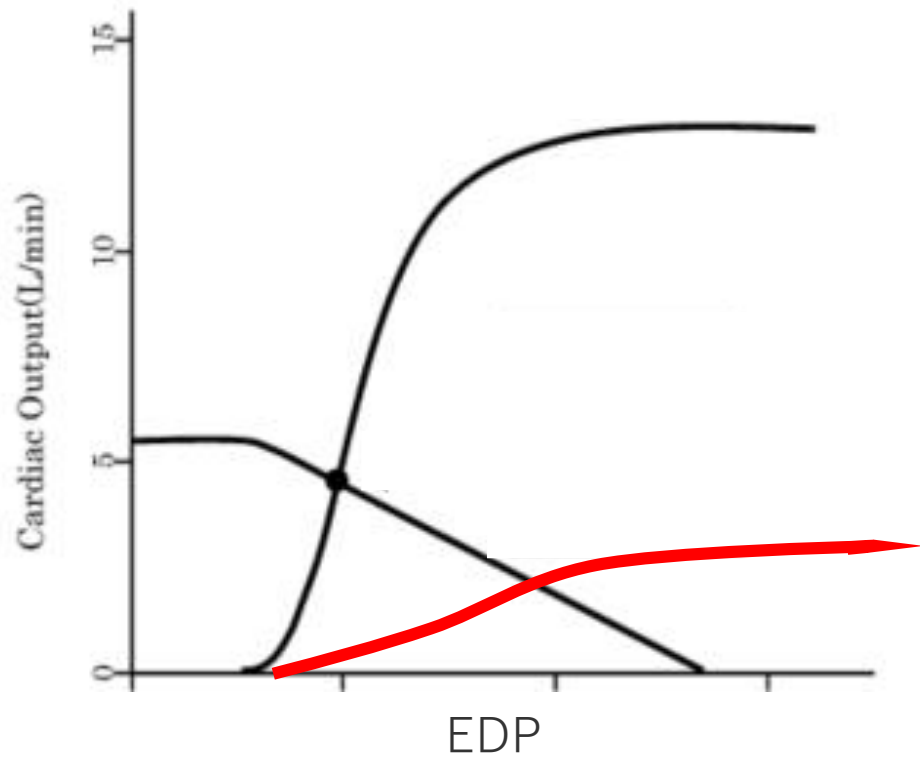


前負荷が変わる = 動作点のX軸の値が変わる = いろいろな要因で変わる

# Back to PV loop

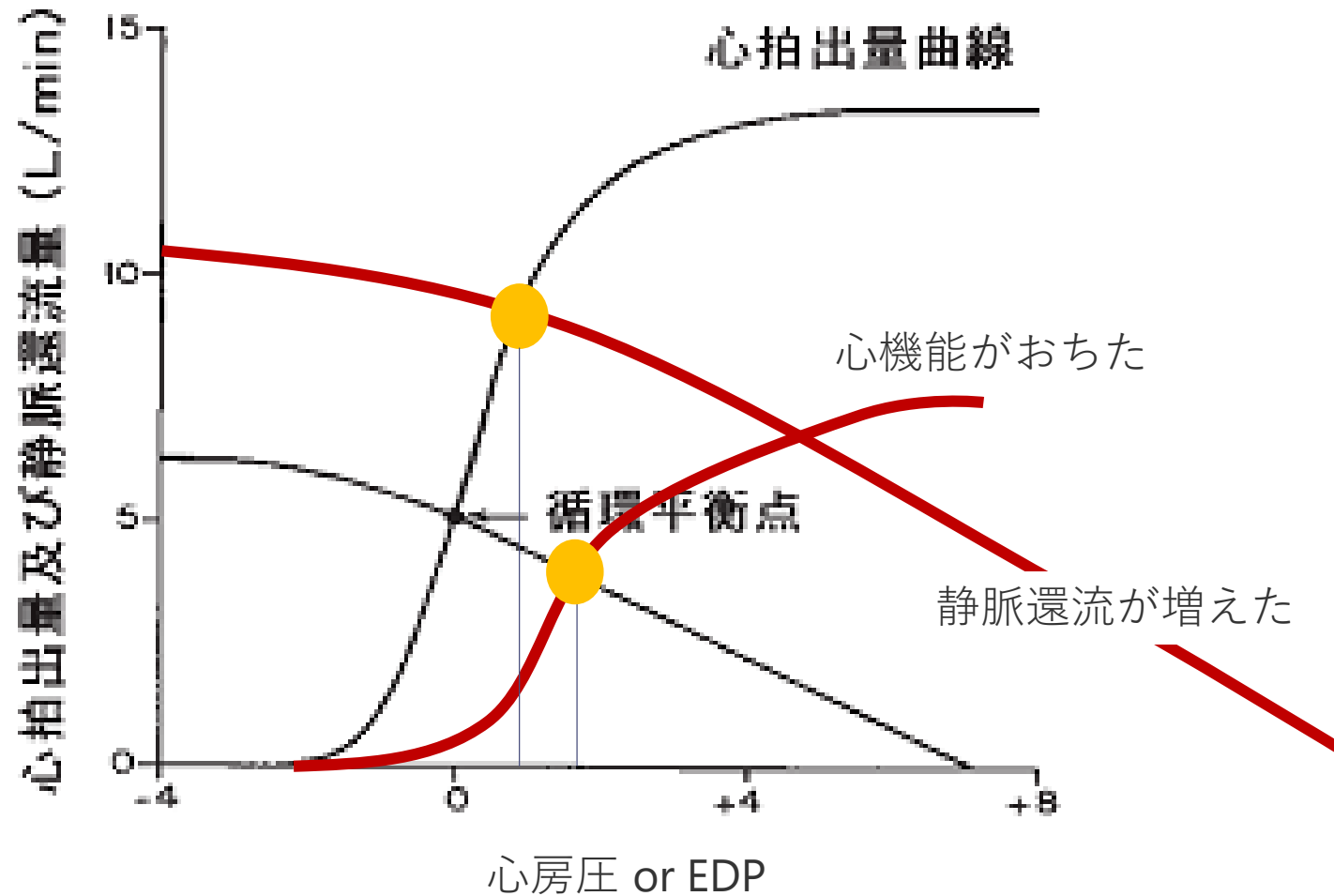


# 心収縮が低下すると前負荷が増える



※X軸はわかりやすさのためにEDPと書いています。RAPでは？と思った人は素晴らしい！

# 前負荷はさまざまな要素で決まる



# 循環平衡まとめ

---

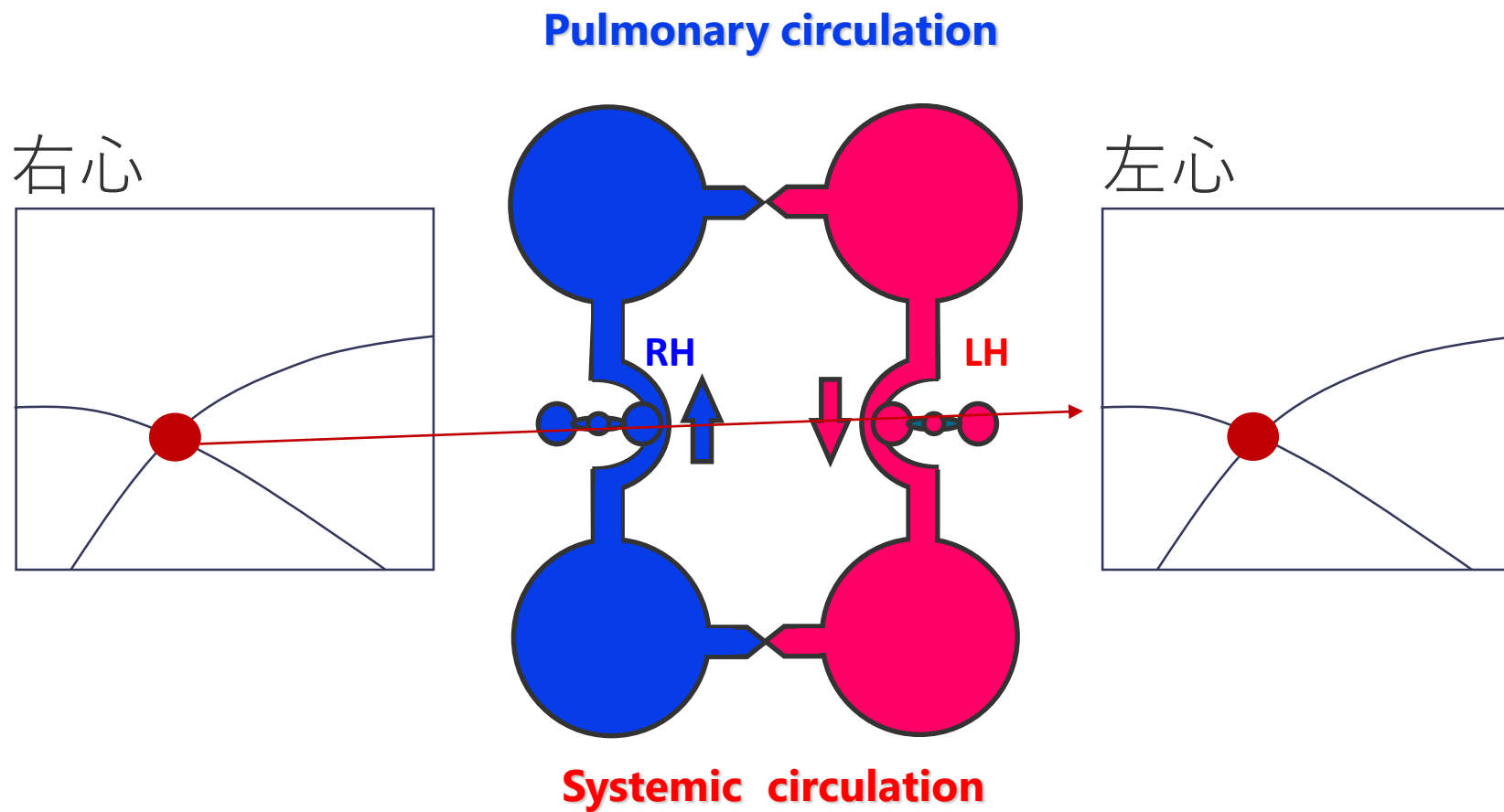
- PV loopの理解を「正確に」循環平衡へ延長させることで、循環動態の把握は一気に進む。
- 前負荷は心臓、血管、血液量のあらゆる要素によって決まる。  
→補助循環を考える時にはより重要になる
- ガイトンは最強である



# Deep dive into circulatory equilibrium

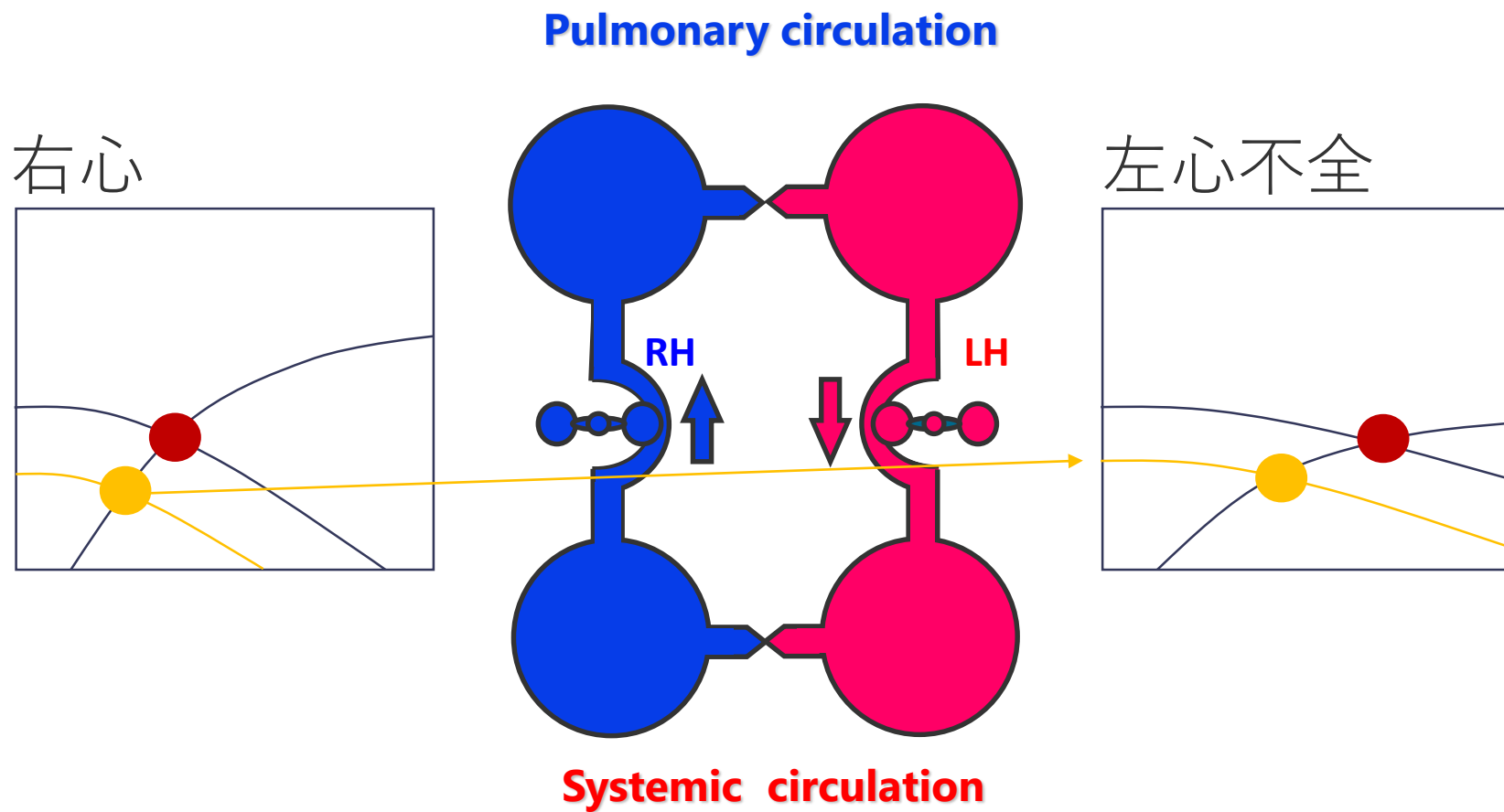


# 人体は2心室 = 臨床ではこう考える！



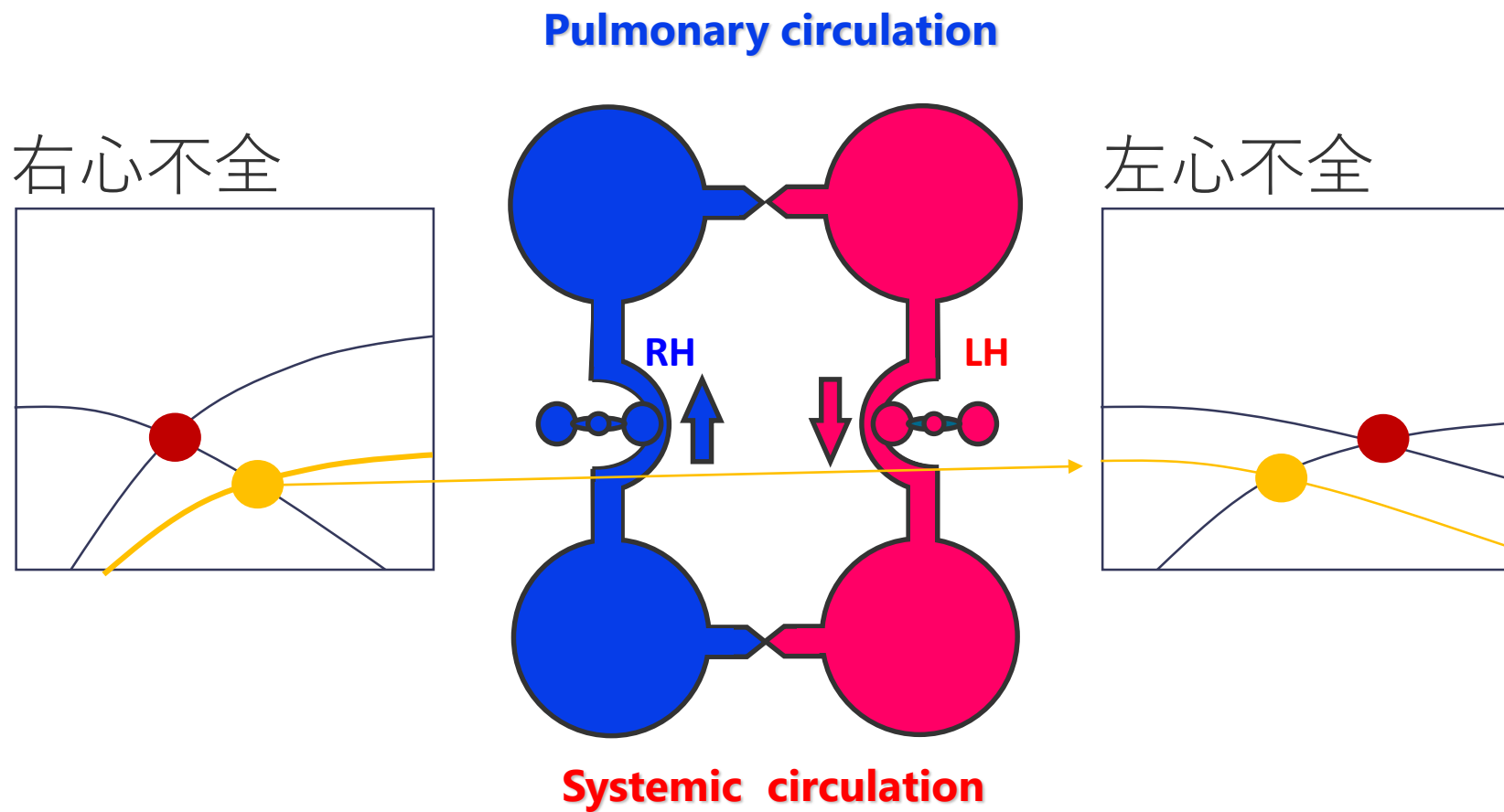
想像ツールとしてはアリ

# 利尿剤



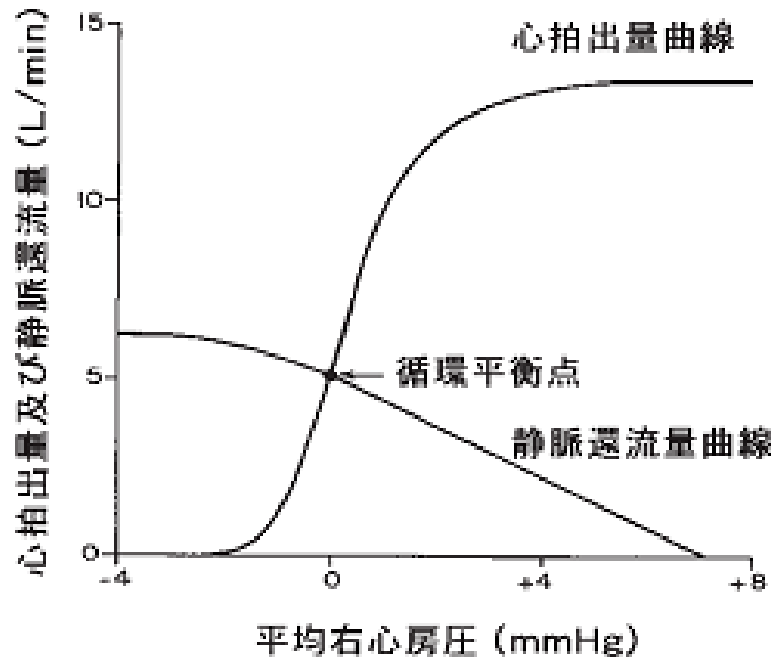
想像ツールとしてはアリ

# 右心不全



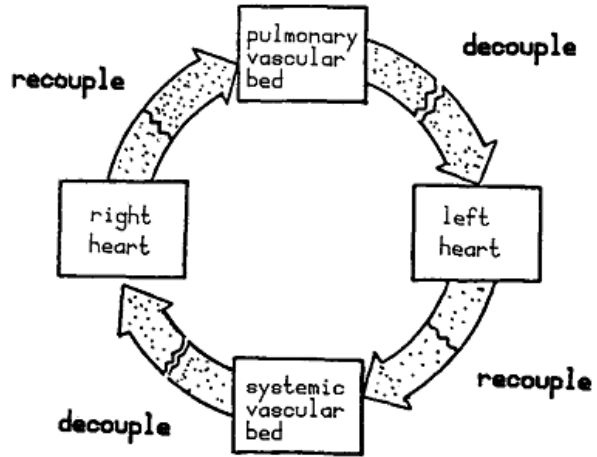
想像ツールとしてはアリ

# 2心室であることをもっときちんと示す



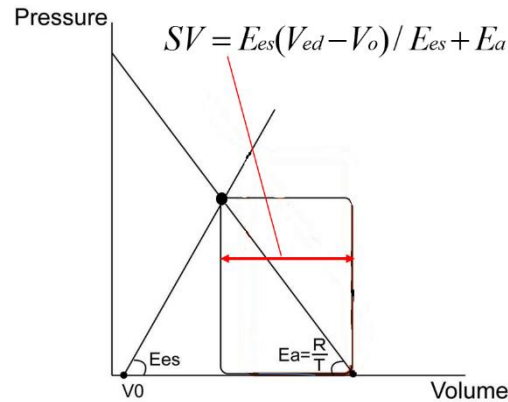
- ガイトン循環平衡は横軸右心房
- 左心房圧の定義ができない
  - 循環の理解が片手落ち
  - 肺うっ血とか左心PV loopとかにまで議論が伸びない
- 定量的な話はできない
  - ざっくりした話にとどまる

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

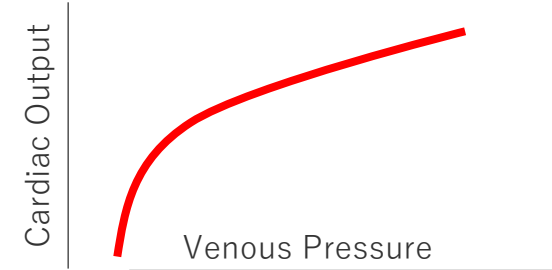


循環を体循環/右心/肺循環/左心の4つのコンパートメントにわけモデル化し、再構成する

PV loop



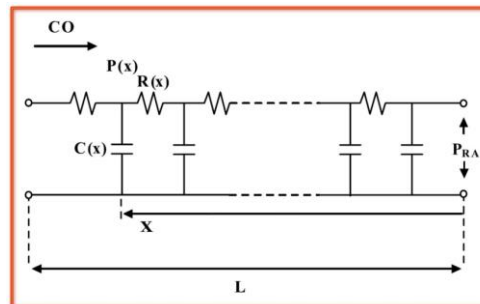
心機能曲線



$$CO = S \{ \log(P_{LA, RA} - F) + H \}$$

左右それぞれの心機能曲線

静脈還流のモデル化

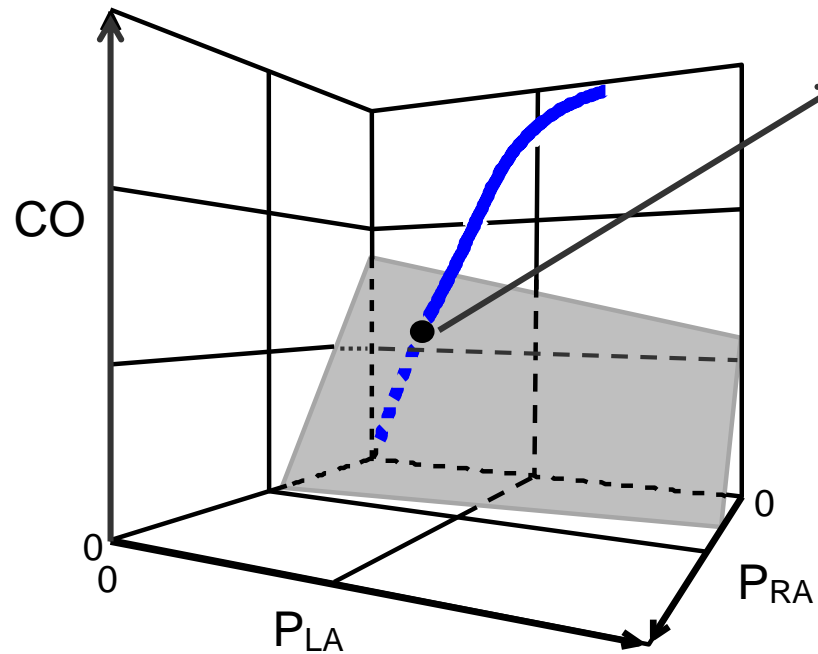


任意の部位の圧とキャパシタンスの積を肺循環、体循環内で積分し、合計する

$$CO = V / W - (G_S P_{RA} + G_P P_{LA})$$

肺循環、体循環が合体した静脈還流

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



循環平衡点

左心機能

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

右心機能

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

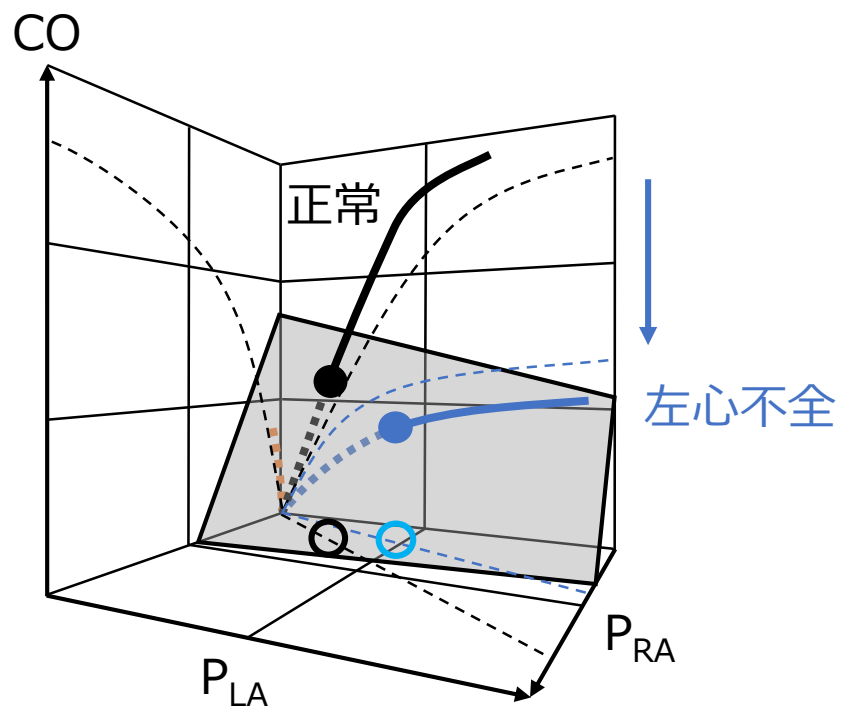
静脈還流平面

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

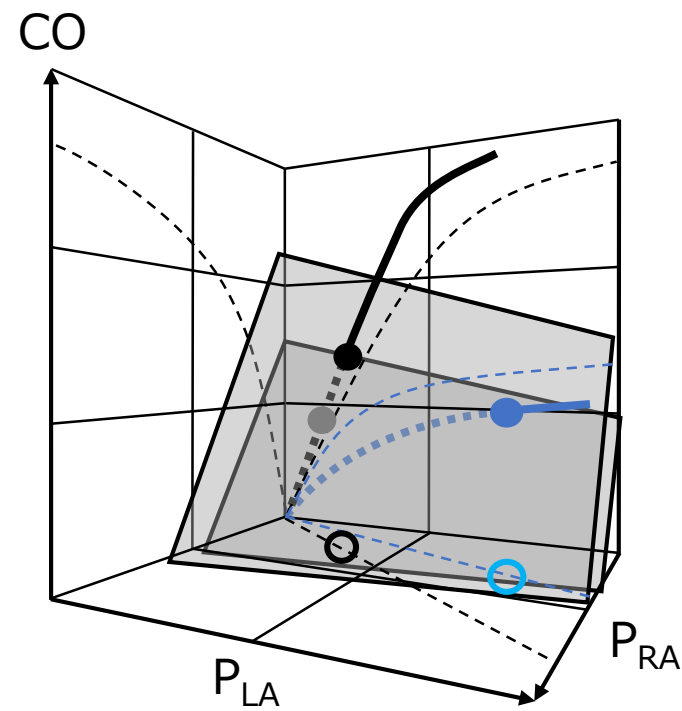
血行動態の理解とは3連立方程式を作り、それを解くことである！

# 3次元で考えるとより臨床に近づく

左心不全



左心不全 + 輸液

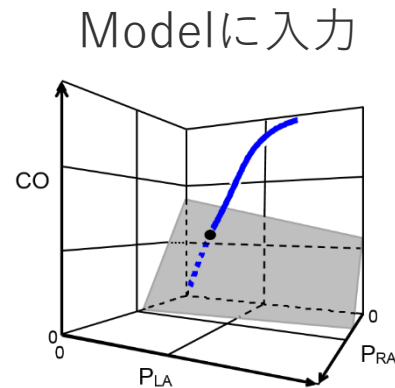




# 3次元で考える意味

血行動態データ

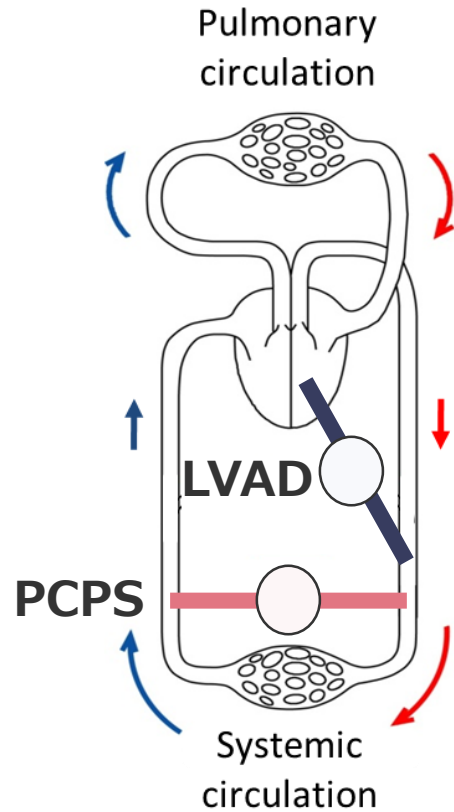
- ・心拍数 (HR)
- ・心拍出量 (CO)
- ・血圧 (AP)
- ・左房圧 ( $P_{LA}$ )
- ・右房圧 ( $P_{RA}$ )



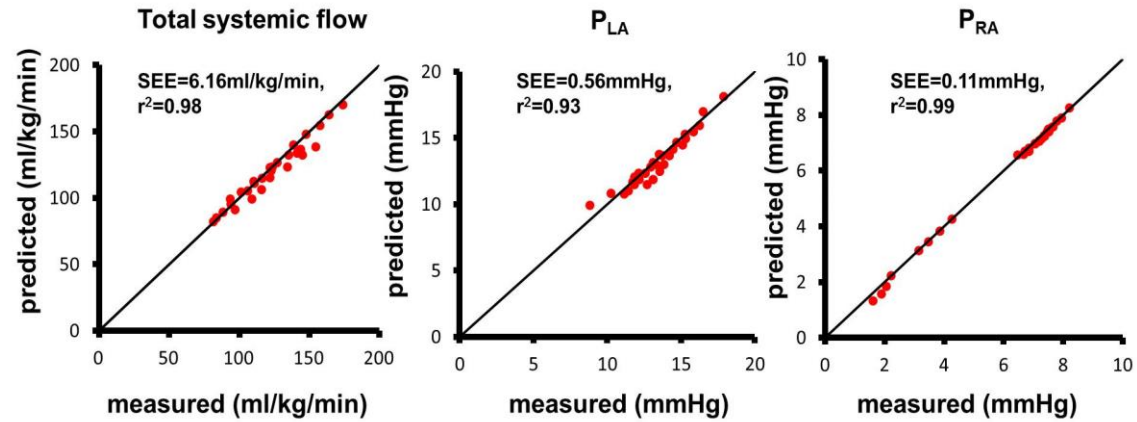
グラフィカルにわかりやすくなるというよりも、右房圧と左房圧の同時にかつ定量的にできるようになる！

血行動態予測  
本質的な循環  
機能同定

# 血行動態予測

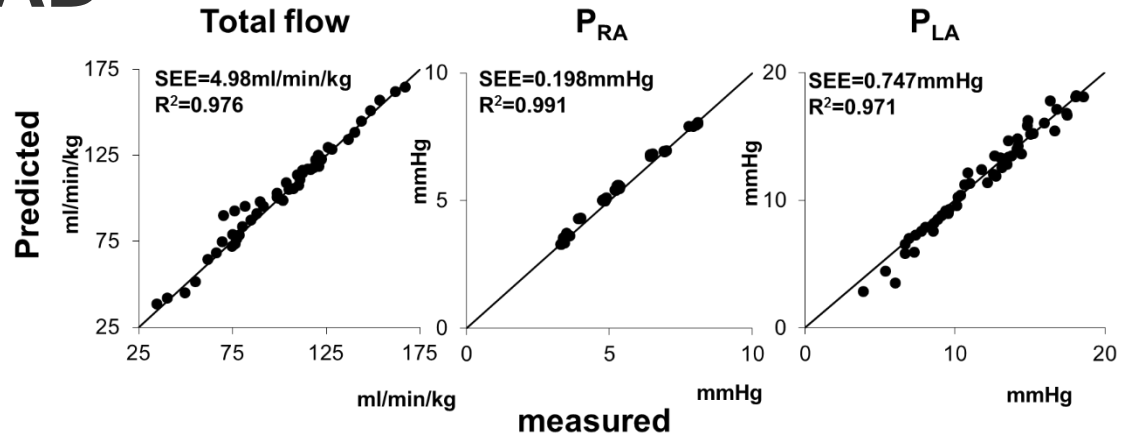


## PCPS



Sakamoto K, Saku K, AJP 2014

## LVAD

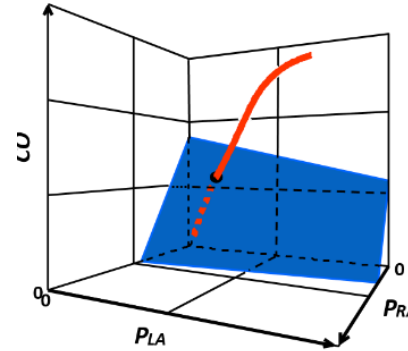
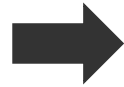


Kakino T, Saku K, AJP 2016

# 血行動態予測

血行動態パラメタ

- ・心拍出量
- ・左房圧
- ・右房圧



血行動態予測

- ・デバイスを使用時
- ・デバイスweaning時
- ・複合的治療

- **PCPS** : Prediction of the impact of venoarterial extracorporeal membrane oxygenation on hemodynamics. Am J Physiol Heart Circ Physiol. 2015.
- **LVAD** : Prediction of hemodynamics under left ventricular assist device. Am J Physiol Heart Circ Physiol. 2017.
- **Partial LVAD** : Upward-shift of cardiac output curve determined by the synergistic effect of support flow and left ventricular ejection fraction is the fundamental mechanism to improve hemodynamics by left ventricular assist device. Frontier in physiology. 2020.
- **ASD** : Prediction of hemodynamics after atrial septal defect closure using a framework of circulatory equilibrium in dogs. Am J Physiol Heart Circ Physiol. 2020.
- **ISD (心房中隔シャントデバイス)** : Prediction of hemodynamics after interatrial shunt placement for heart failure using the framework of generalized circulatory equilibrium. ESC Heart Failure. 2020.
- **RVAD** : Prediction of hemodynamics under right ventricular assist device. Preparing.

# 交感神経緊張の影響

## Impact of baroreflex on venous return surface

Takafumi Sakamoto, Yoshinori Murayama, Atsushi Tanaka, Kazuo Sakamoto, Tomoyuki Tobushi, Keita Saku, Kazuya Hosokawa, Ken Onitsuka, Takeo Fujino and Kenji Sunagawa, Senior Member, IEEE

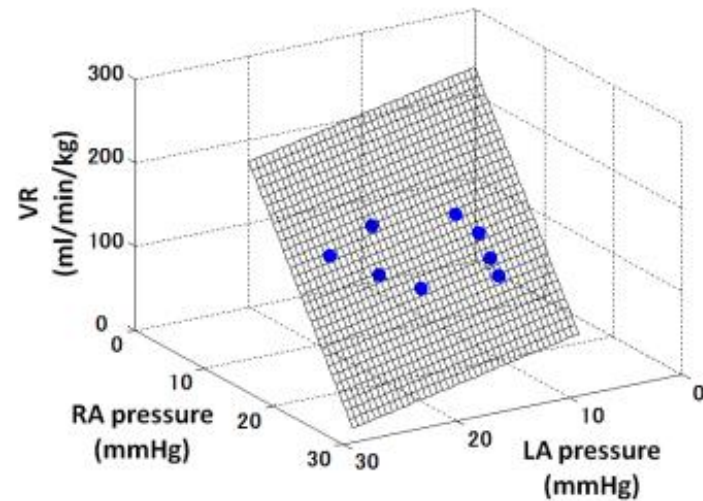


Figure 2 Representative venous return surface at CSP 140mmHg

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

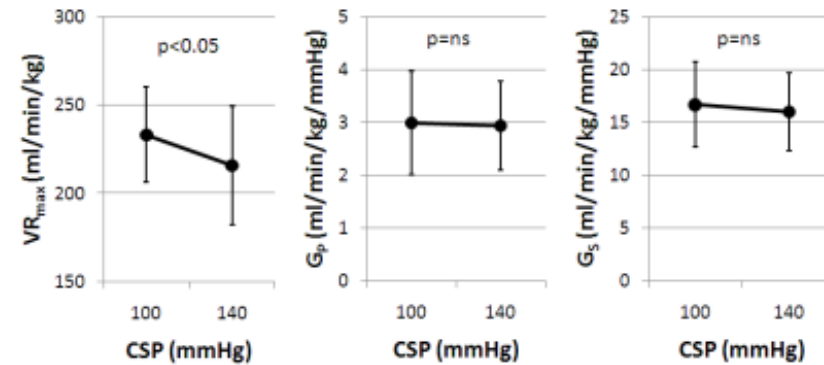


Figure 3  $VR_{\max}$ ,  $G_p$ , and  $G_s$  obtained at CSP 100 and 140 mmHg

交感神経を動脈圧反射刺激で低下させると、平面がそのまま下に平行シフトすることを示した

# 循環平衡まとめ

---

- 循環平衡こそが循環をイメージする最強ツール
- 今の循環動態はさまざまな要素で成り立っている