

Basic lecture

今こそ整理！

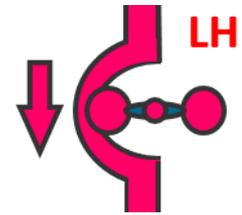
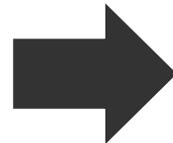
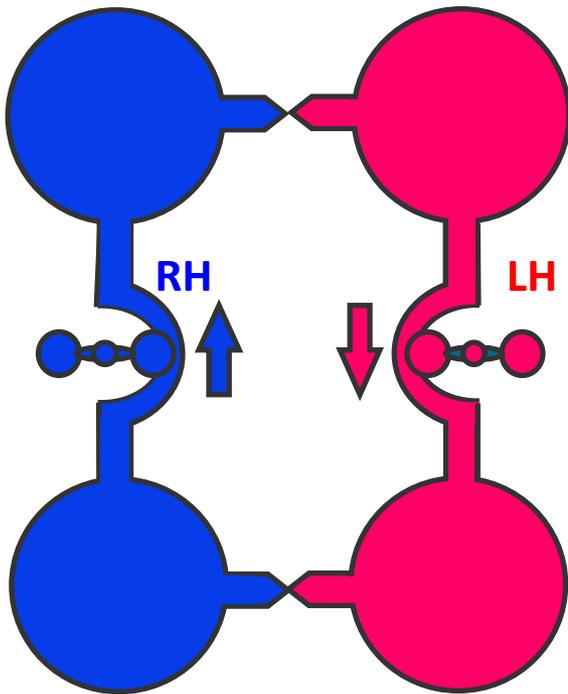
臨床に役立つPV loopと循環平衡

Keita Saku, MD, PhD

Kyushu University

Scope

Pulmonary circulation

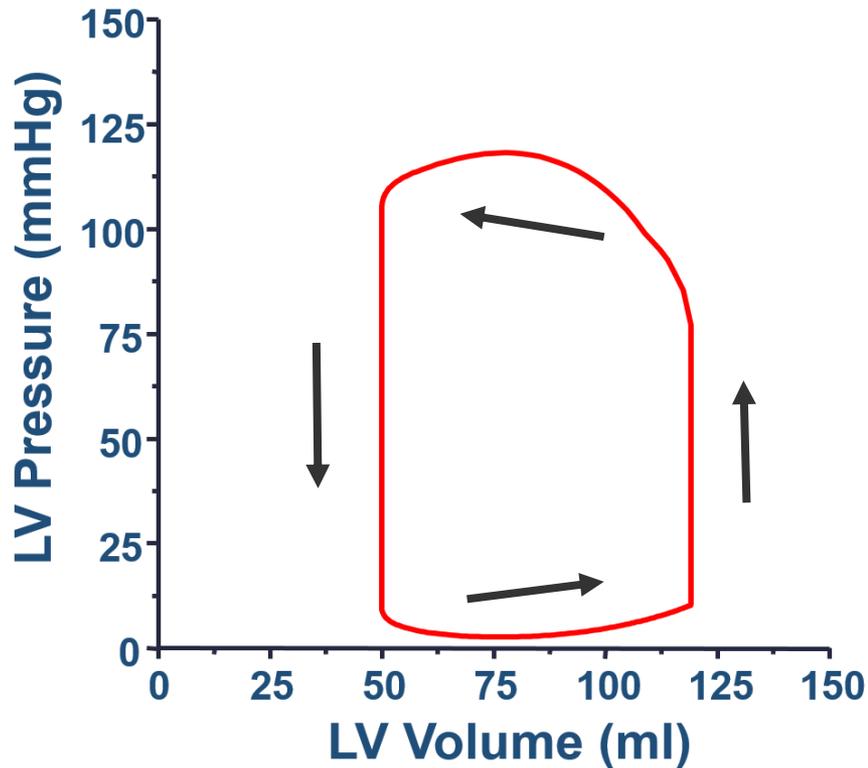


Systemic circulation

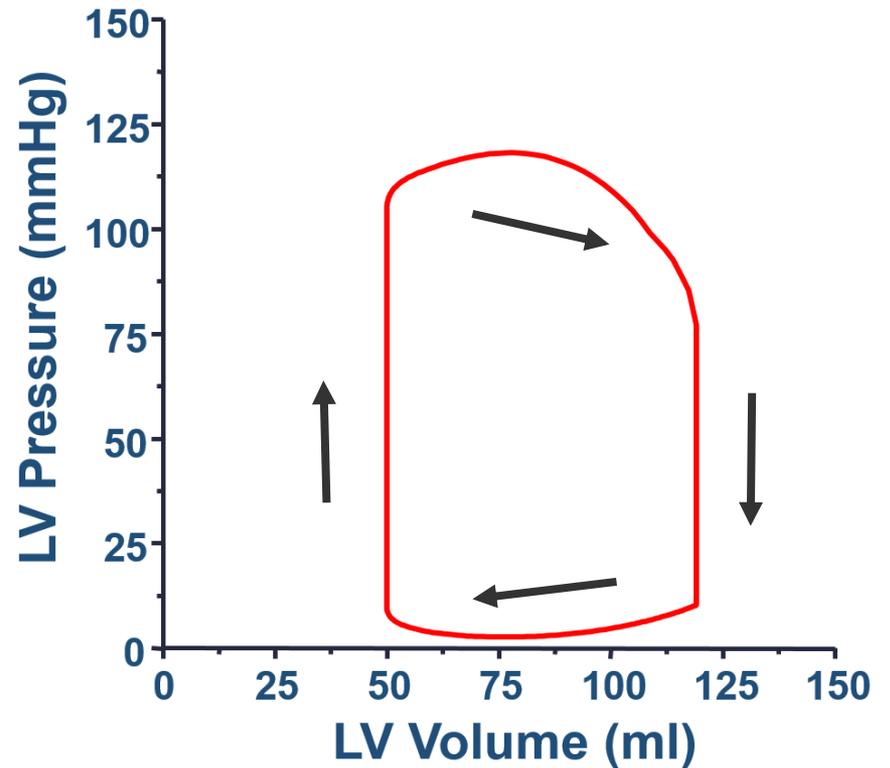
問題①

正しいのはどちら？

A

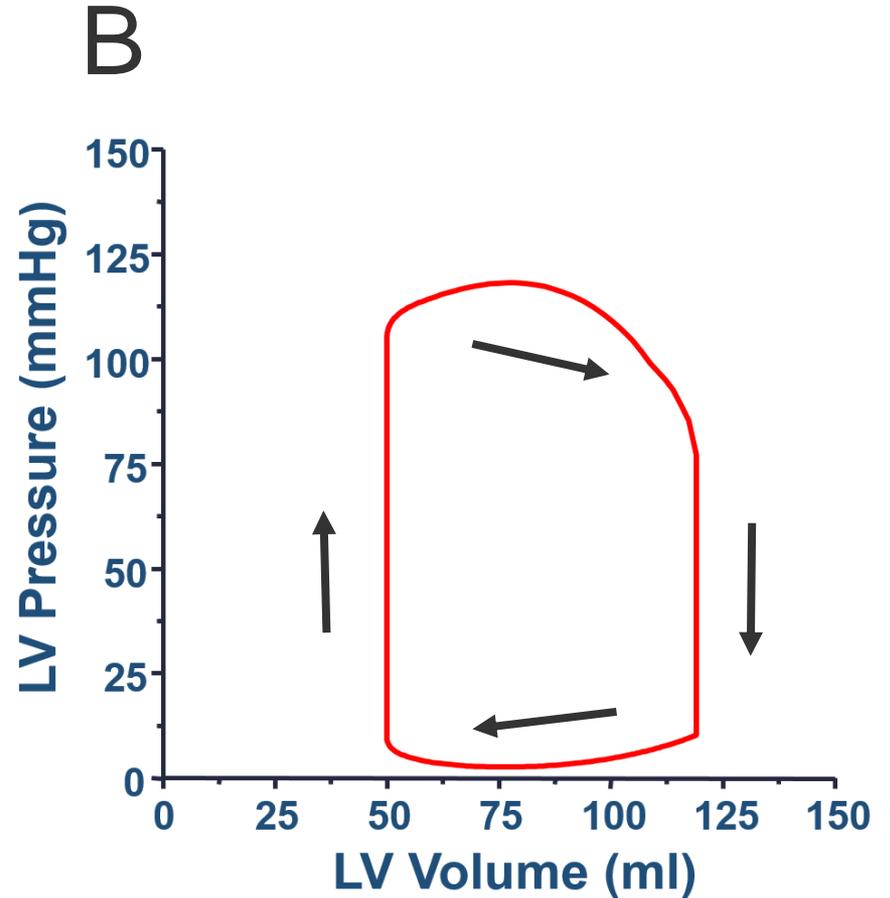
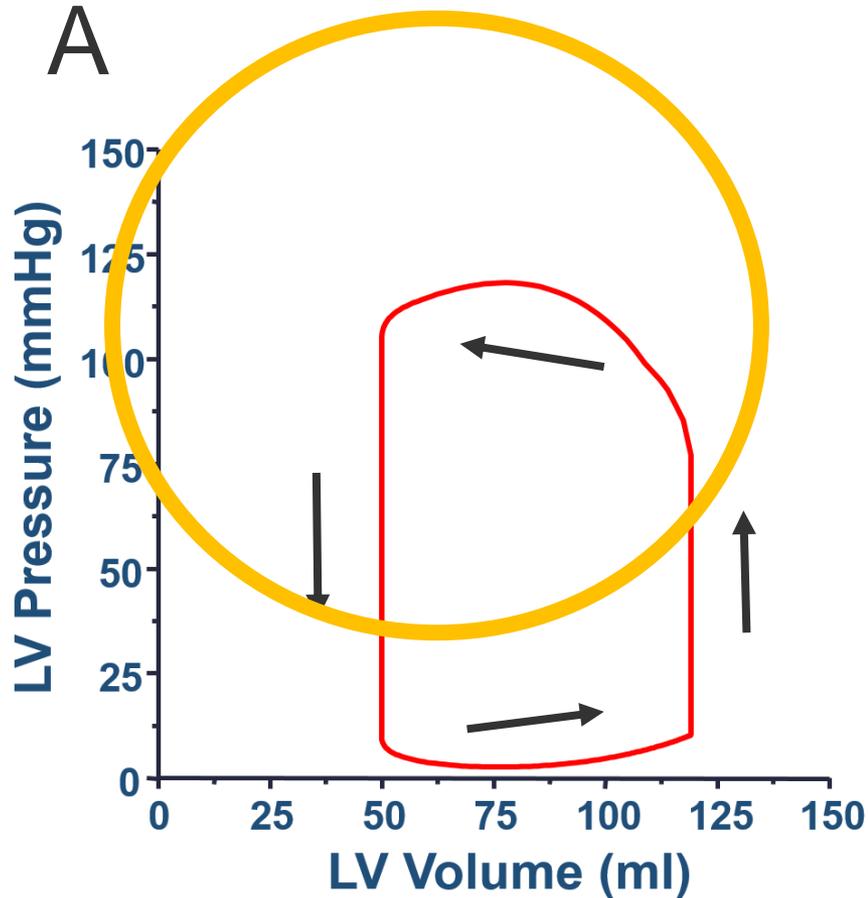


B

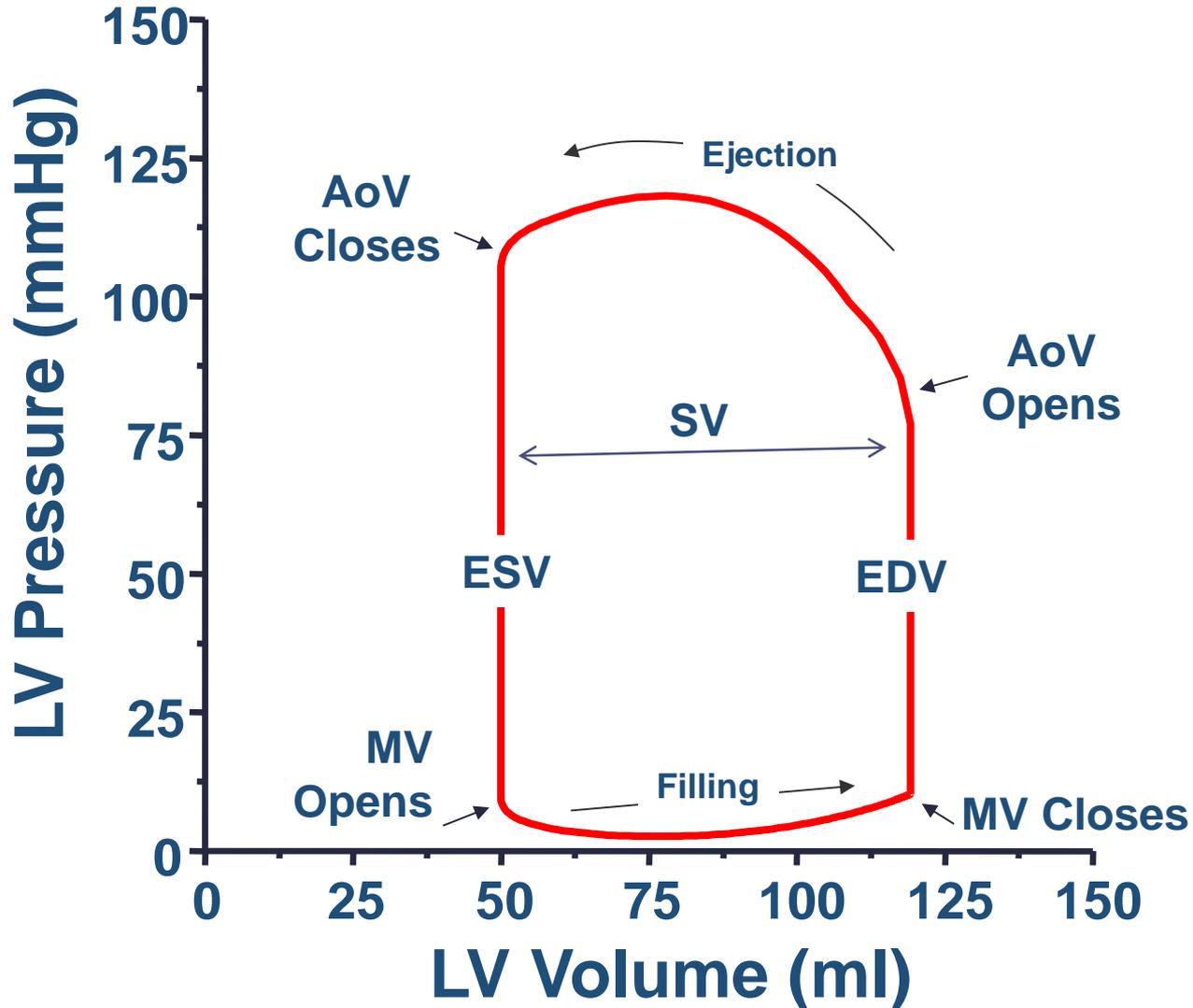


問題①

正しいのはどちら？



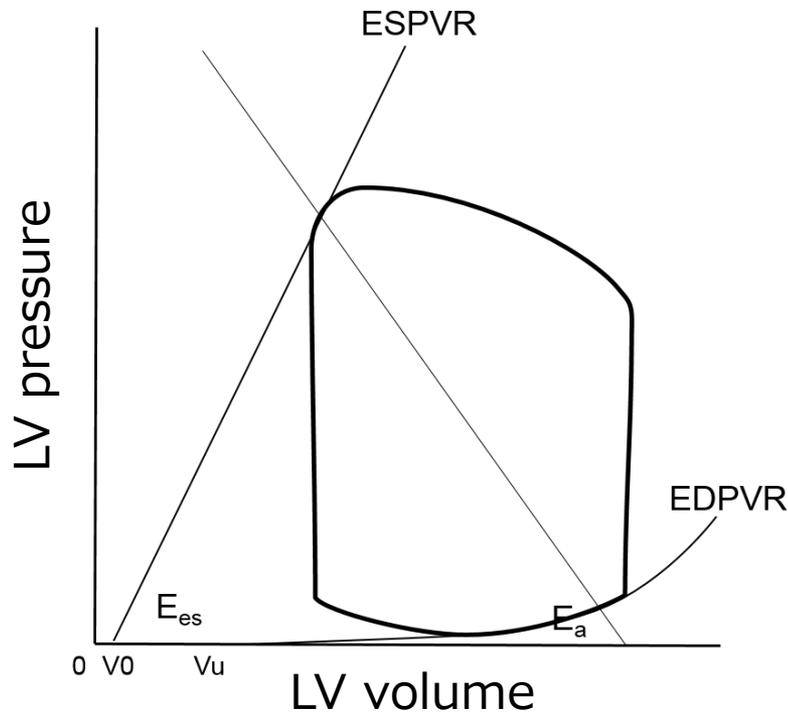
Pressure-volume loop



PV loopを考える意義

ただの圧と容量のグラフが
「**心臓の声を聴く**」ツールになる

Pressure-volume loop



心臓の収縮性と
拡張性が定量化

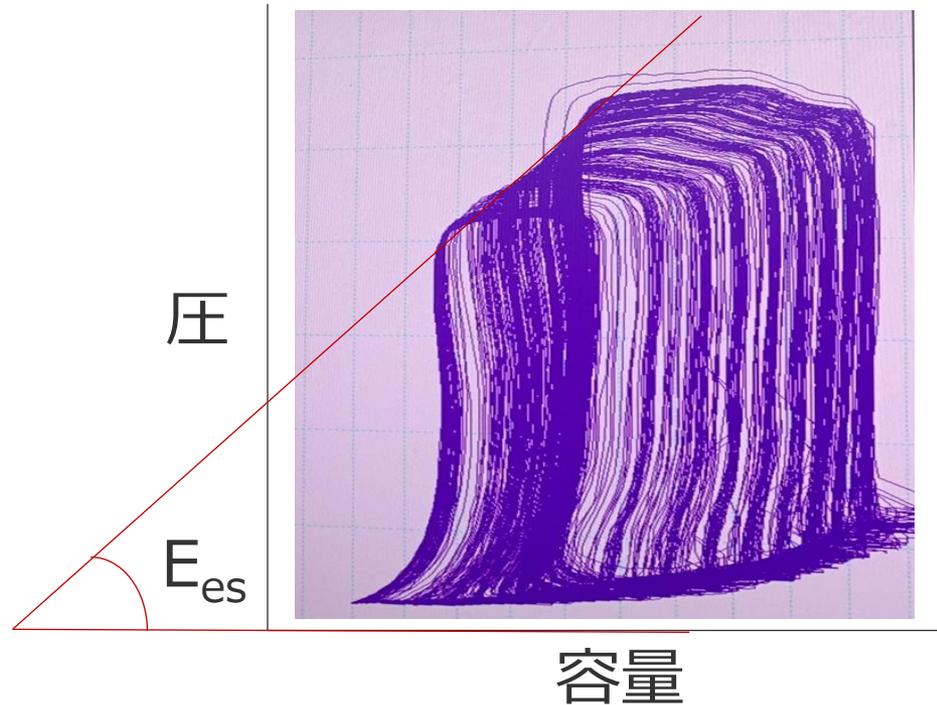
心臓の前負荷と
後負荷が可視化

心臓の酸素消費
を反映

ESPVRの傾き E_{es} = 心臓収縮性



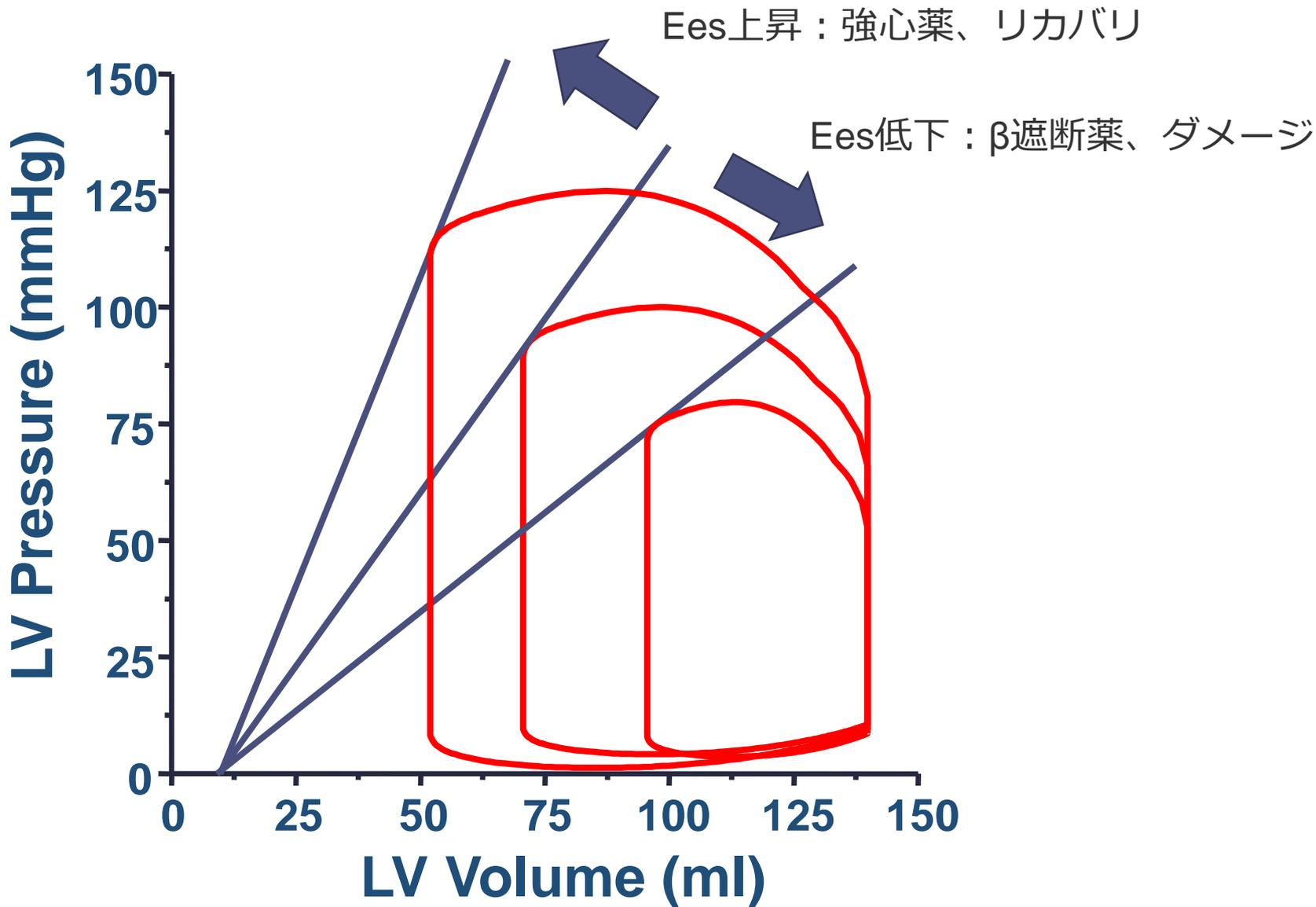
菅 弘之 (1941-現在)



- 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心室固有の直線が引ける。
- 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。

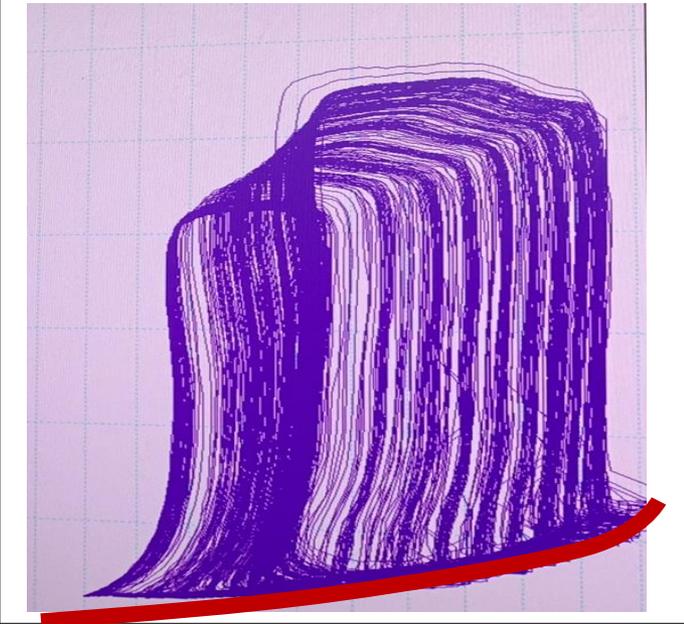
※ E_{max} とすべきかもしれませんが、他スライドとの整合性のため E_{es} と表記

E_{es} の変化



EDPVR=拡張性

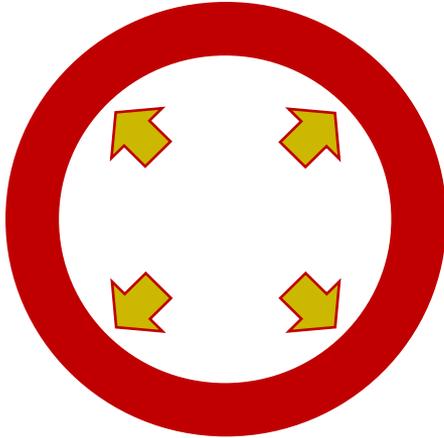
圧



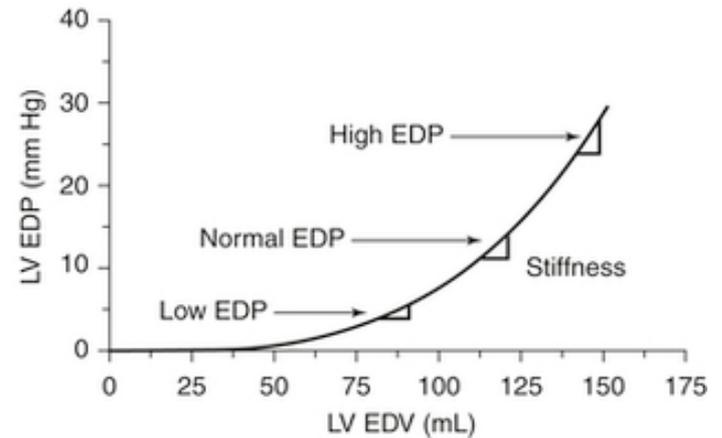
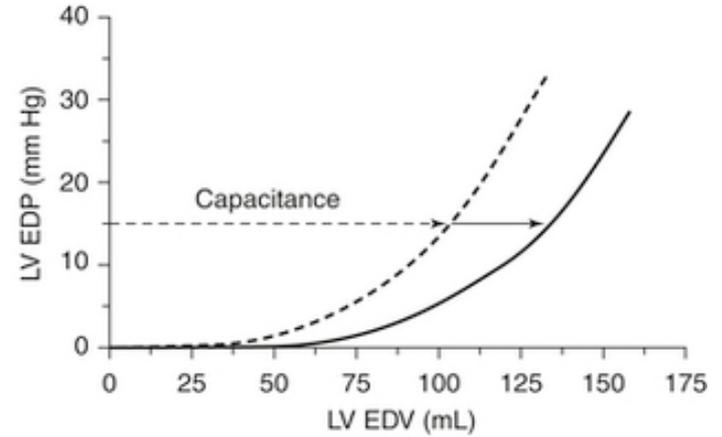
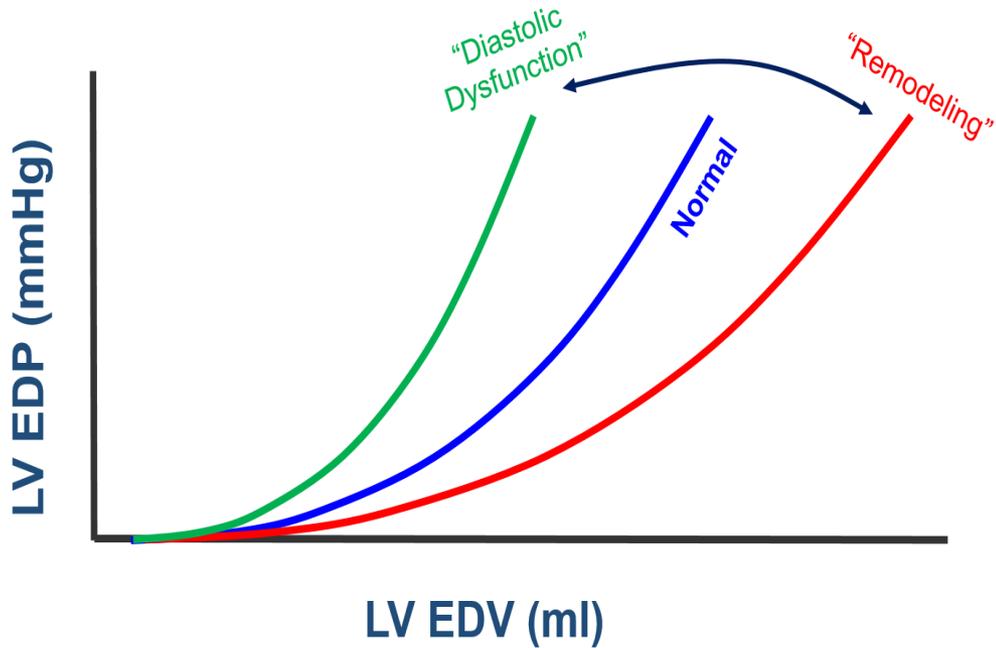
容量

≡

風船の硬さ

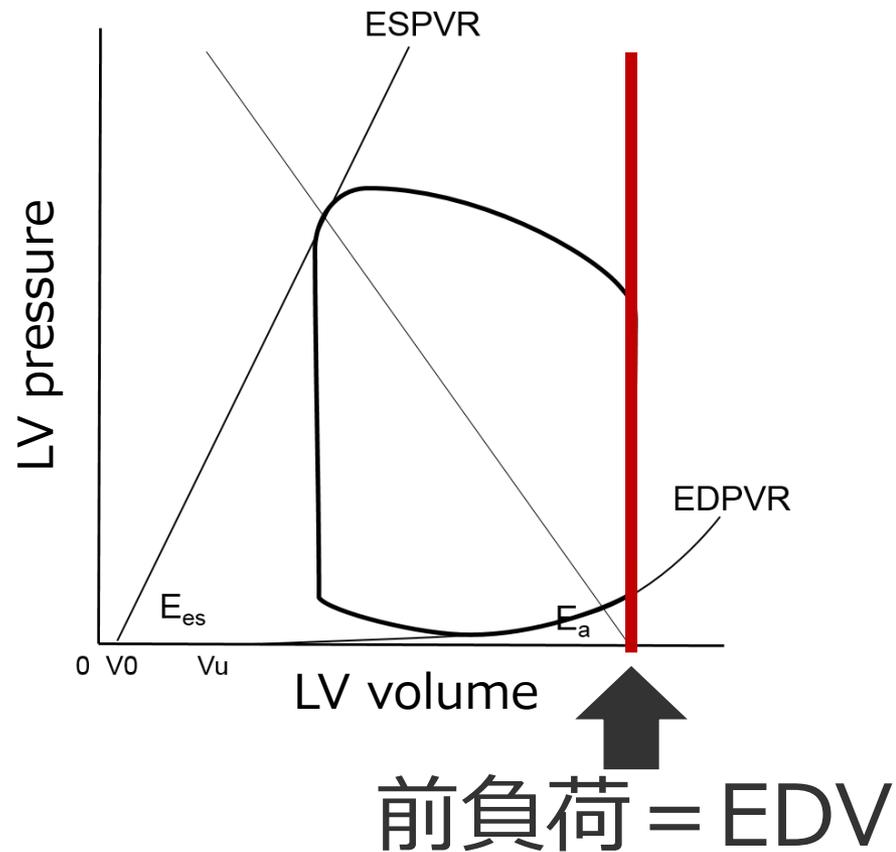


拡張性がよい、悪い

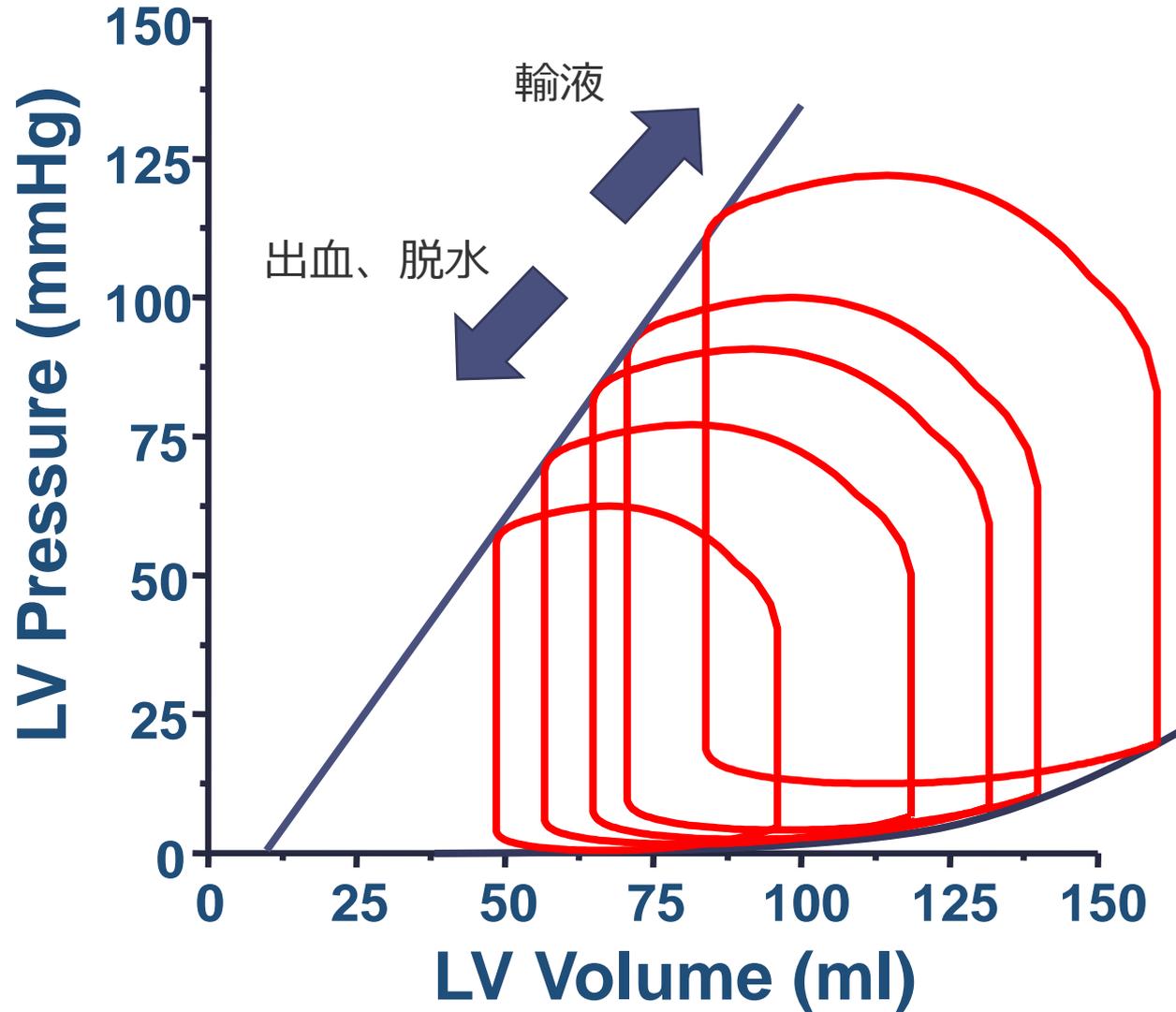


前負荷

Pressure-volume loop

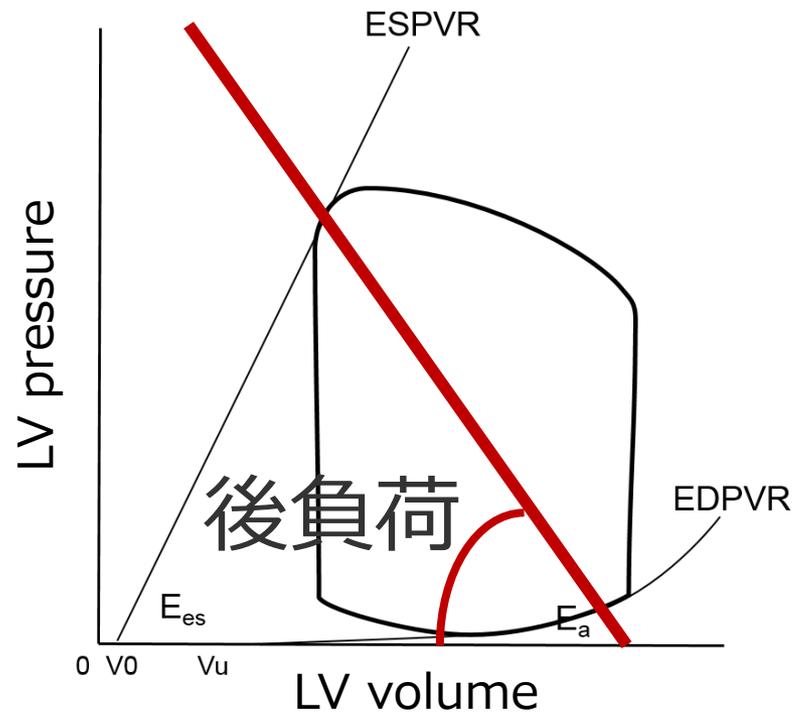


前負荷の変化

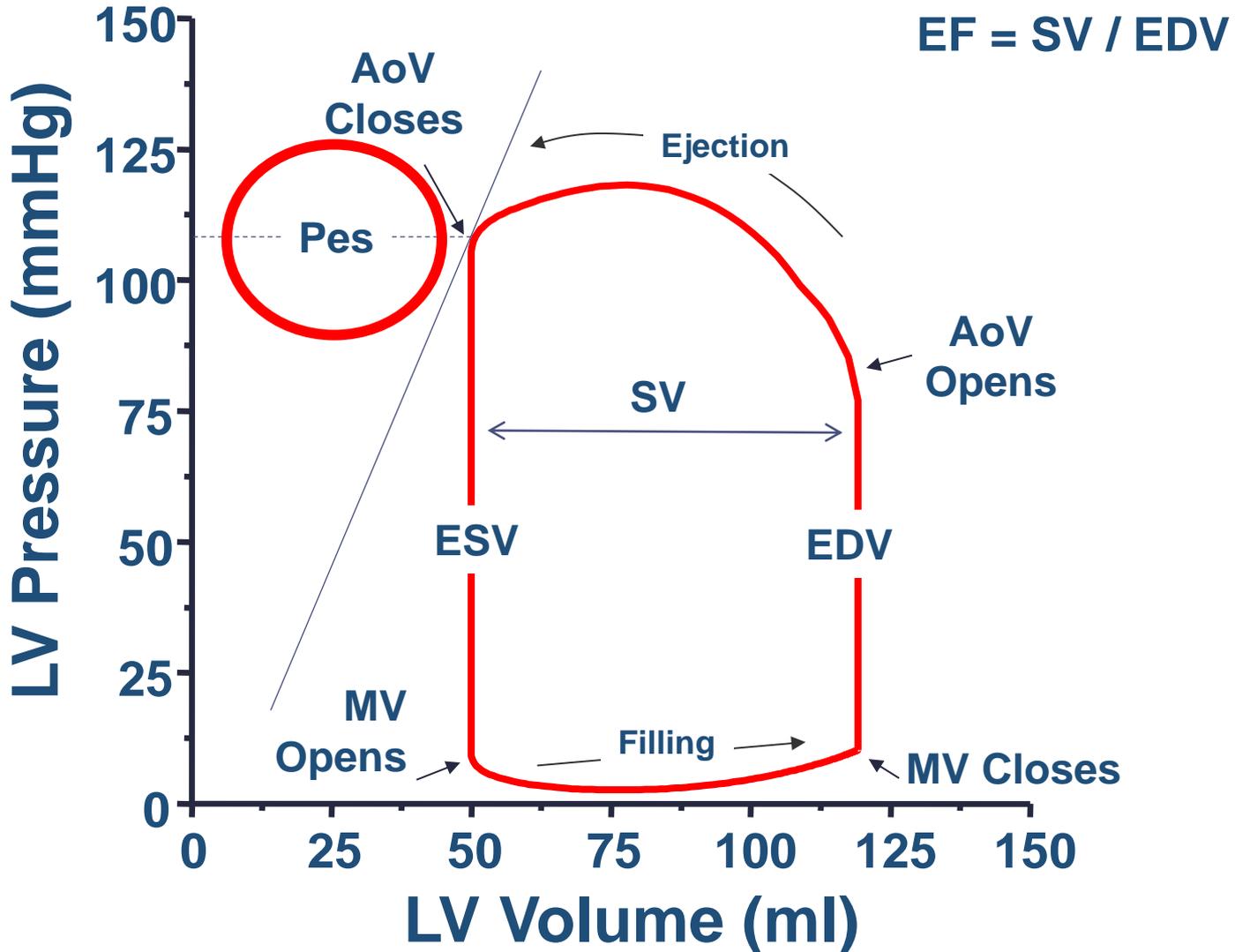


後負荷 = E_a

Pressure-volume loop



Pressure-volume loop



E_a は式展開すると理解できる

$$P_m = R \cdot F \quad \dots \text{ 血圧と血管抵抗、心拍出の関係}$$

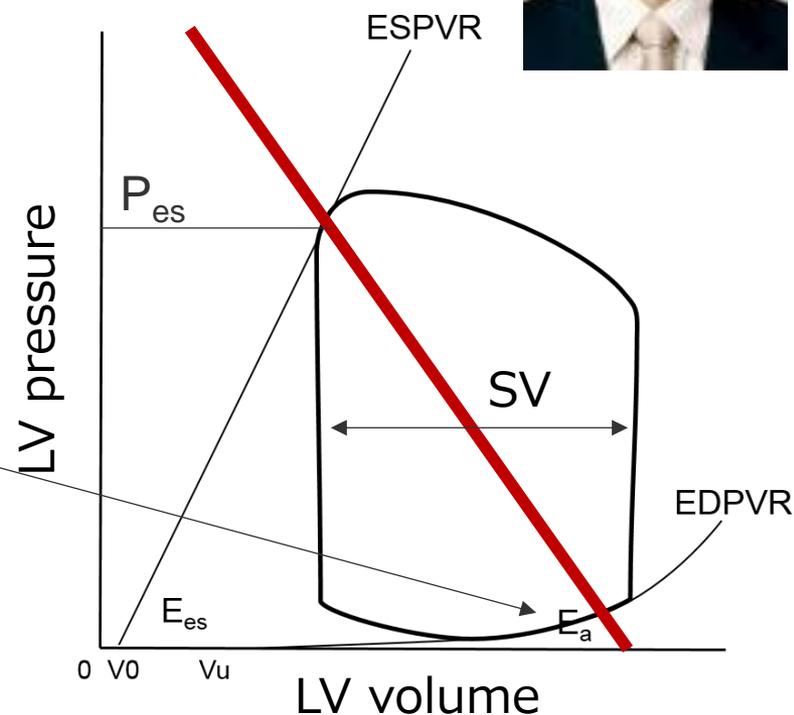
$$F = SV \cdot HR$$

$$P_m \doteq P_{es} \text{ と近似、}$$

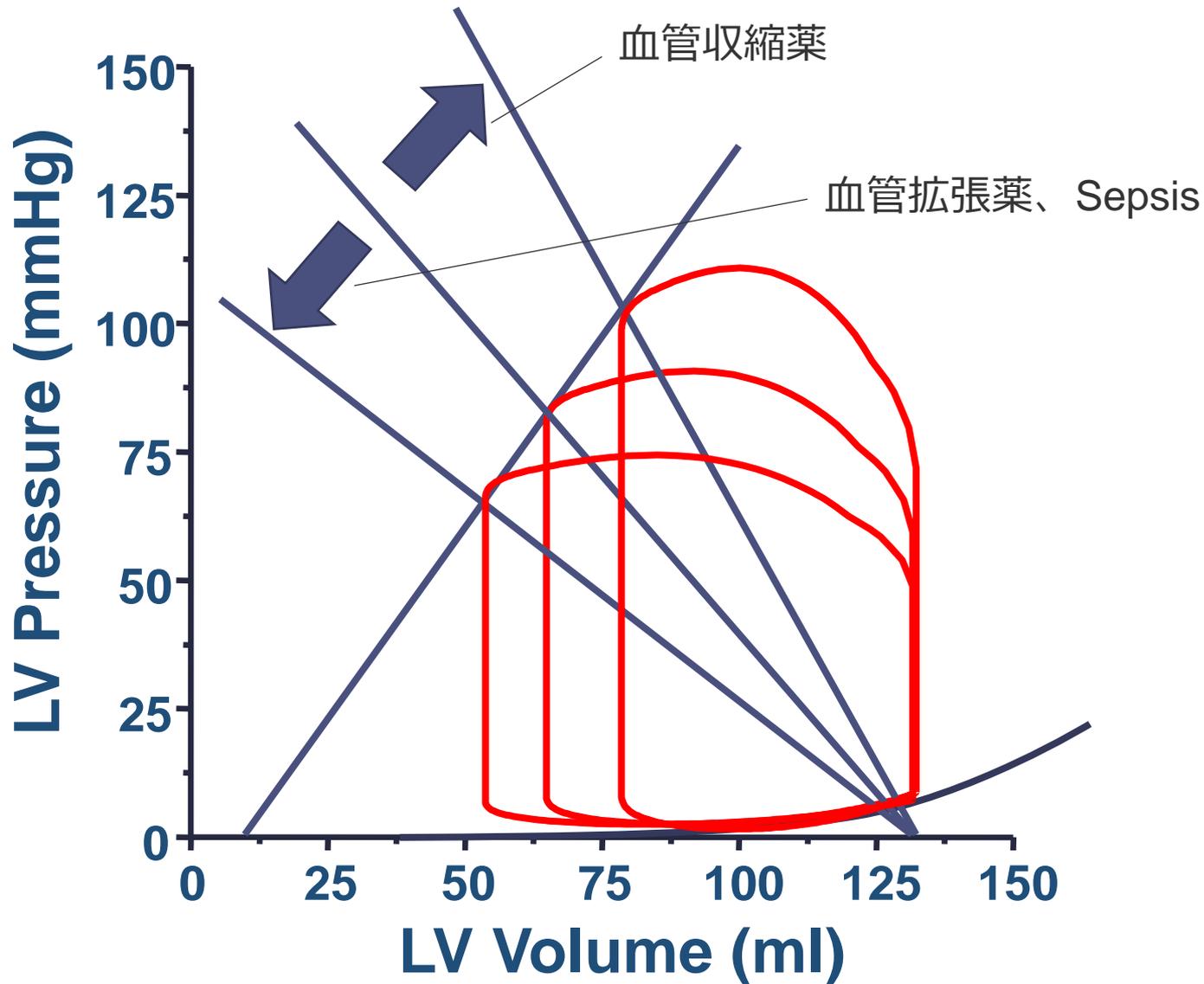
$$P_{es} \doteq R \cdot SV \cdot HR \\ = (R \cdot HR) \cdot SV$$

ここで $R \cdot HR$ は収縮末期圧・1回拍出量関係の直線の傾きであり、心室に対する実効的な「後負荷」の指標となる。これを実効動脈エラスタンス(E_a)と定義すると

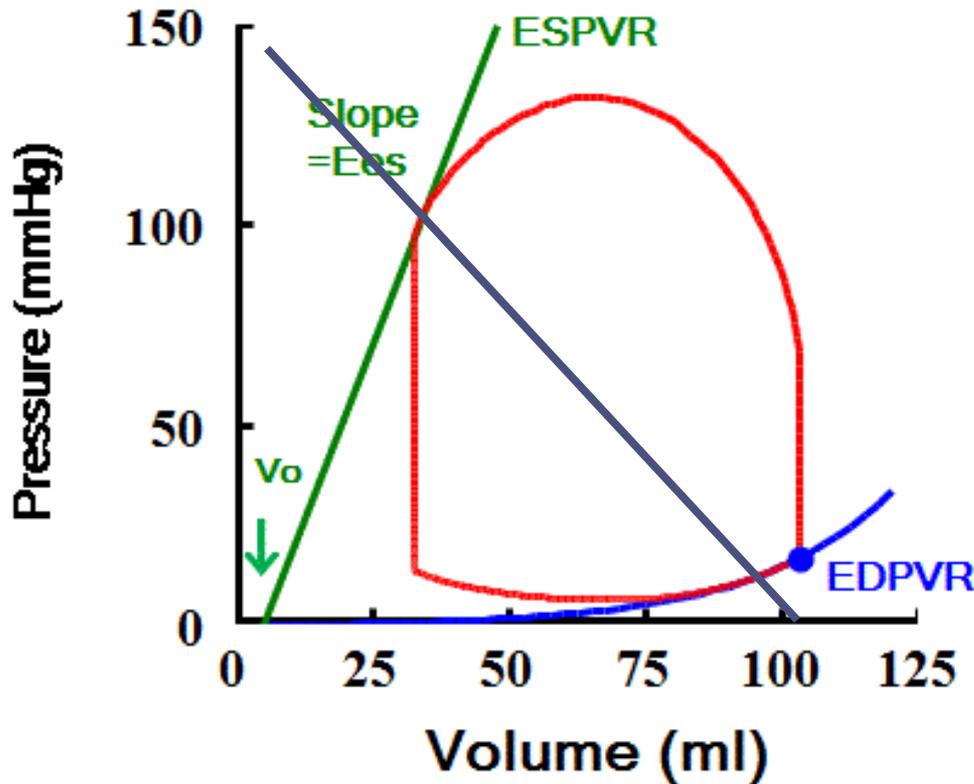
$$P_{es} = E_a \cdot SV$$



後負荷 (E_a) の変化



心室-血管カップリング



心臓収縮で表す

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

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

実効的後負荷で表す

$$P_{es} \approx R \cdot CO$$

$$= (R \cdot HR) \cdot SV$$

$$= (R/T) \cdot SV$$

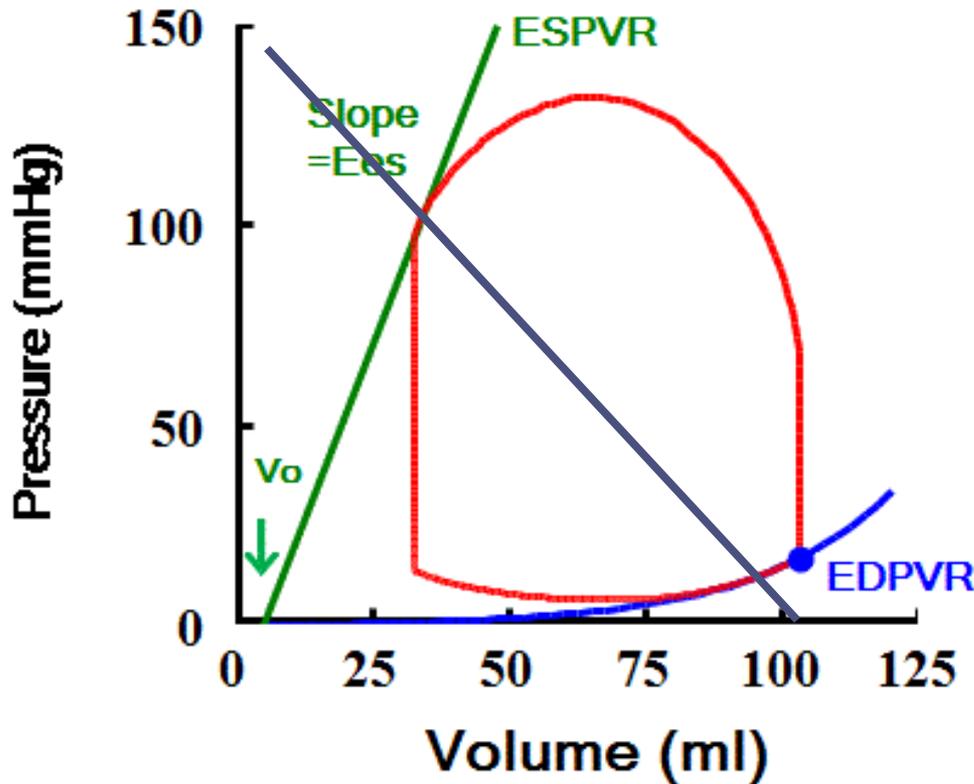
$$= E_a \cdot SV$$

一拍毎の心室-血管カップリング

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

ESPVR: End-Systolic Pressure-Volume Relationship
EDPVR: End-Diastolic Pressure-Volume Relationship

心室カップリング



ESPVR: End-Systolic Pressure-Volume Relationship
EDPVR: End-Diastolic Pressure-Volume Relationship

心臓収縮で表す

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

実効的後負荷で表す

$$P_{es} \approx R \cdot CO \\ = (R \cdot HR) \cdot SV \\ = (R/T) \cdot SV \\ = E_a \cdot SV$$

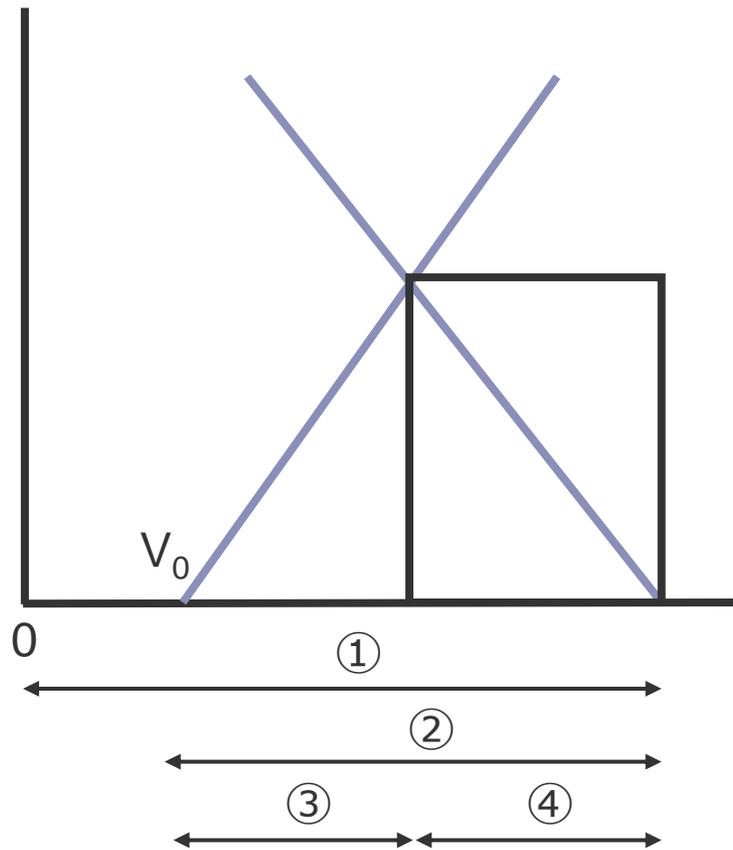
一拍毎の心室-血管カップリング

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

Effective ejection fraction: EF_e

問題②

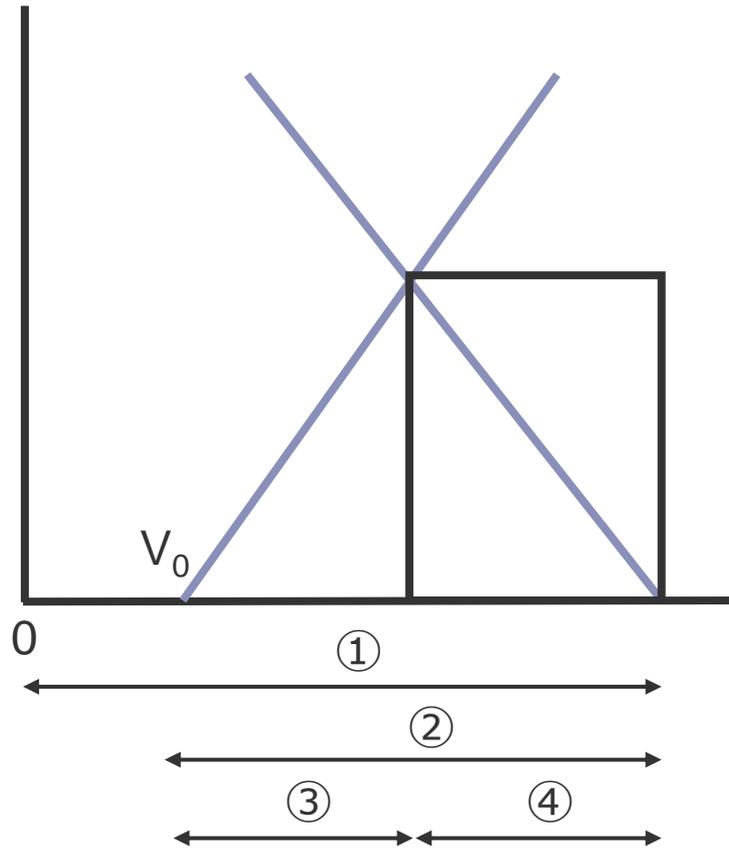
工コ-EFはどれ？



- A: _____ ④
_____ ①
- B: _____ ④
_____ ②
- C: _____ ③
_____ ②
- D: _____ ②
_____ ①

問題②

工コ-EFはどれ？



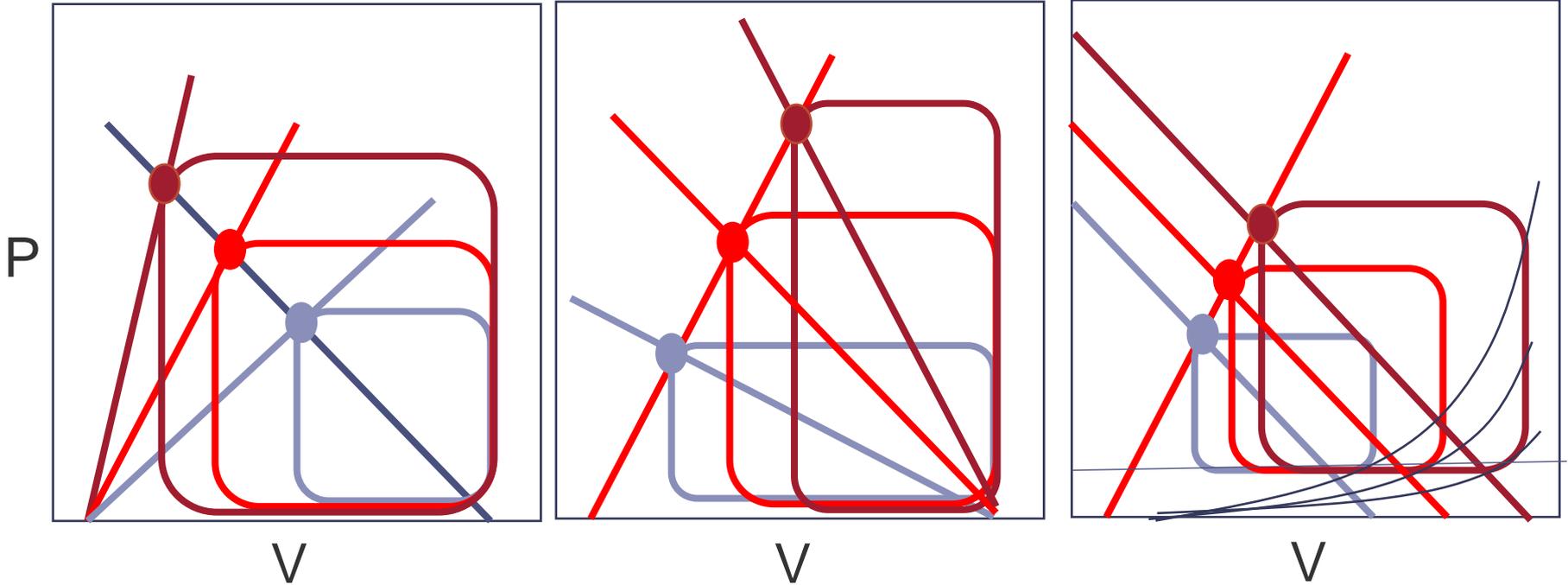
- A: ④
①
- B: ④
②
- C: ③
②
- D: ②
①

SVを決める仕組み（チラシの答）

E_{es}

$E_a (=R HR)$

Stiffness

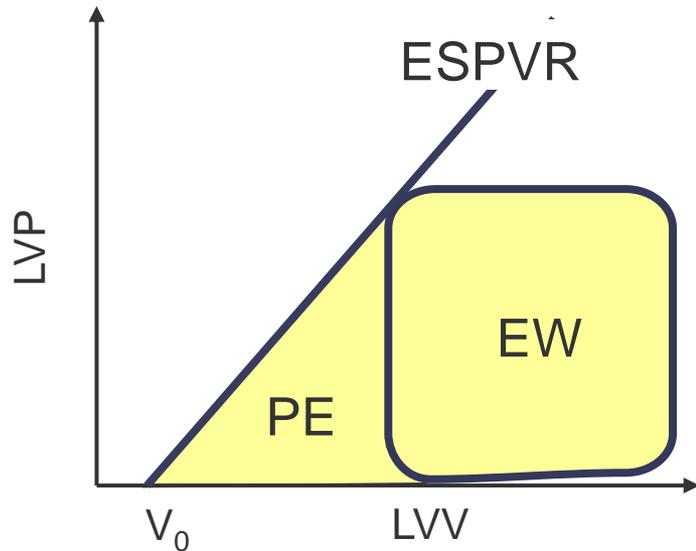


前負荷を一定としたときに、、、
 E_{es} 低下はSV低下
 E_a 上昇はSV低下

LVEDPが同じときに、、、
EDPVRが急峻（拡張障害）だとSV低下

SVがどのように決まるのか一目で把握できる！

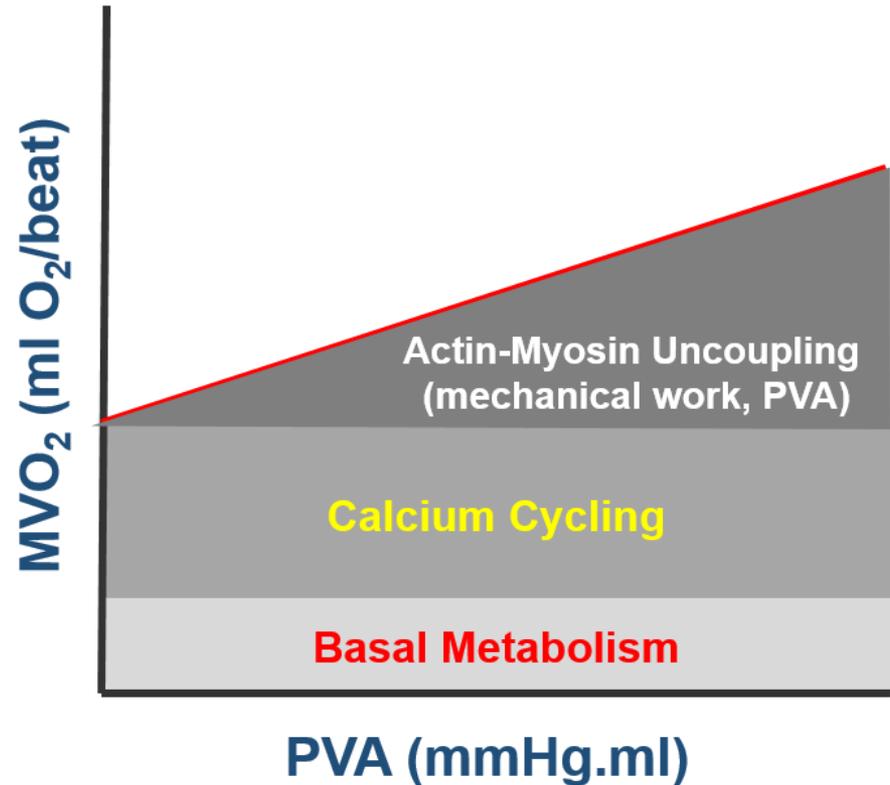
心臓の代謝を直接反映する



EW : External work, 外的仕事

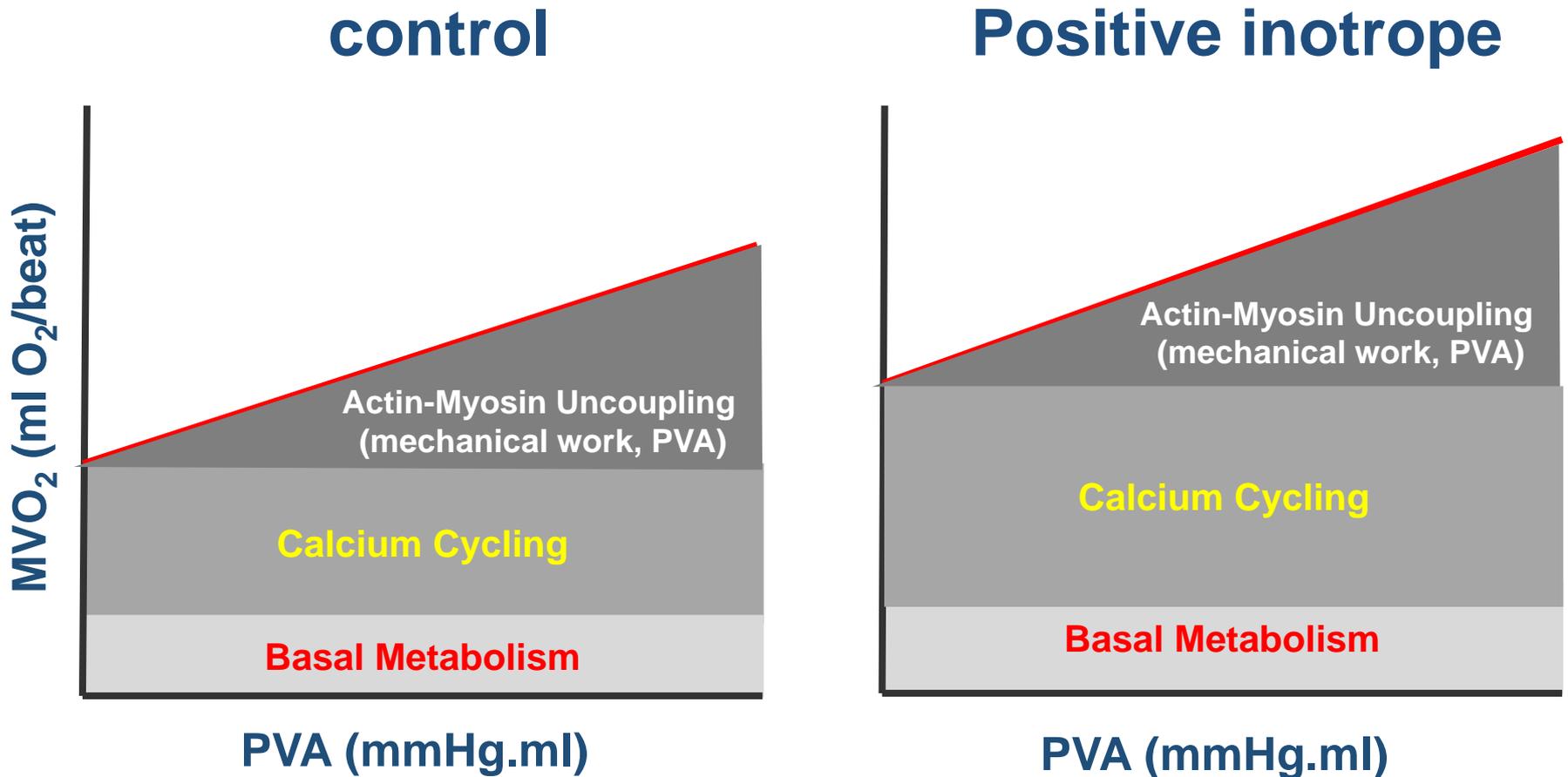
PE : Potential energy

$PVA = EW + PE$



PVAは心室の酸素消費 (/beat) を反映する
= PVAをみれば酸素消費がわかる！

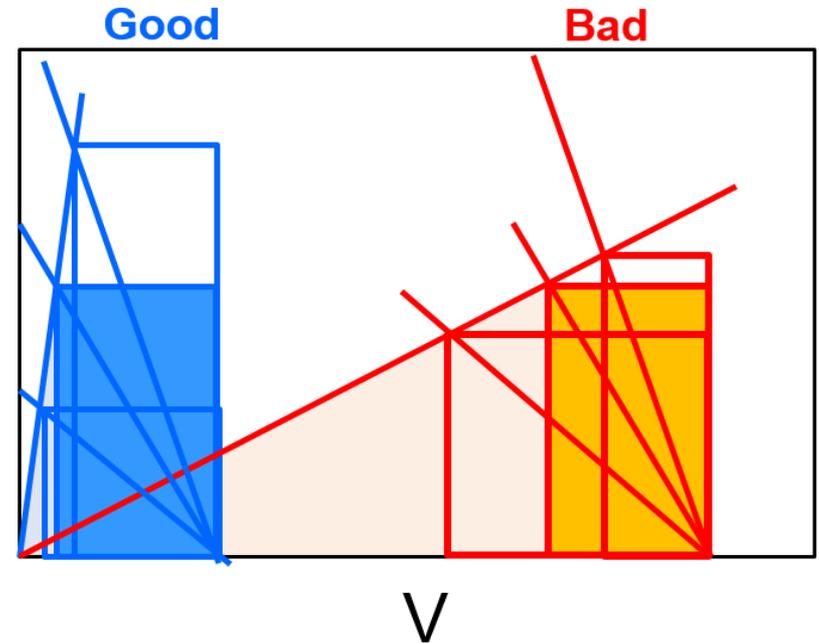
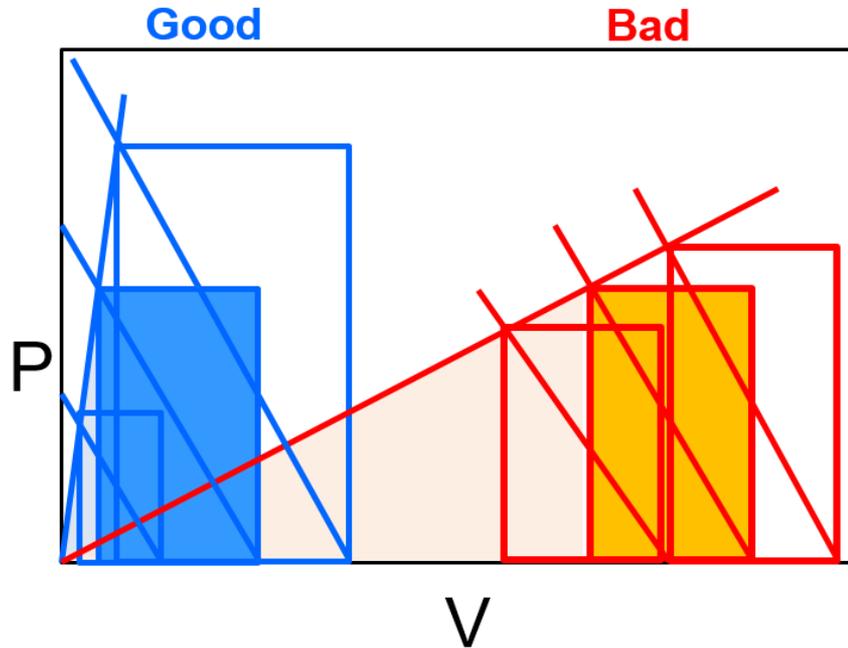
強心薬でも傾きは変わらない



いい心臓、わるい心臓

前負荷

後負荷



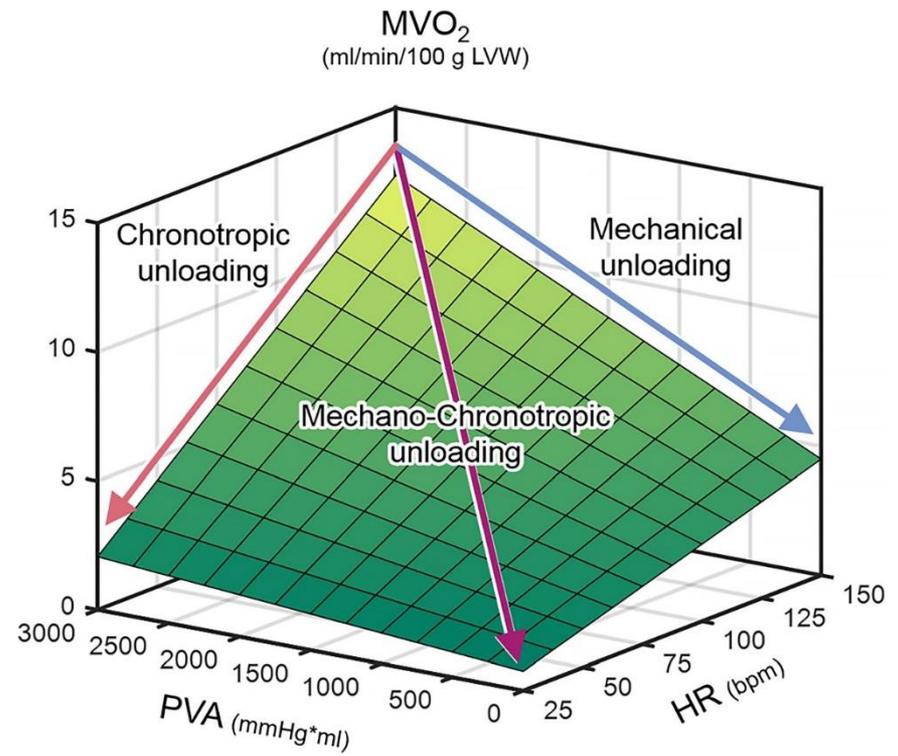
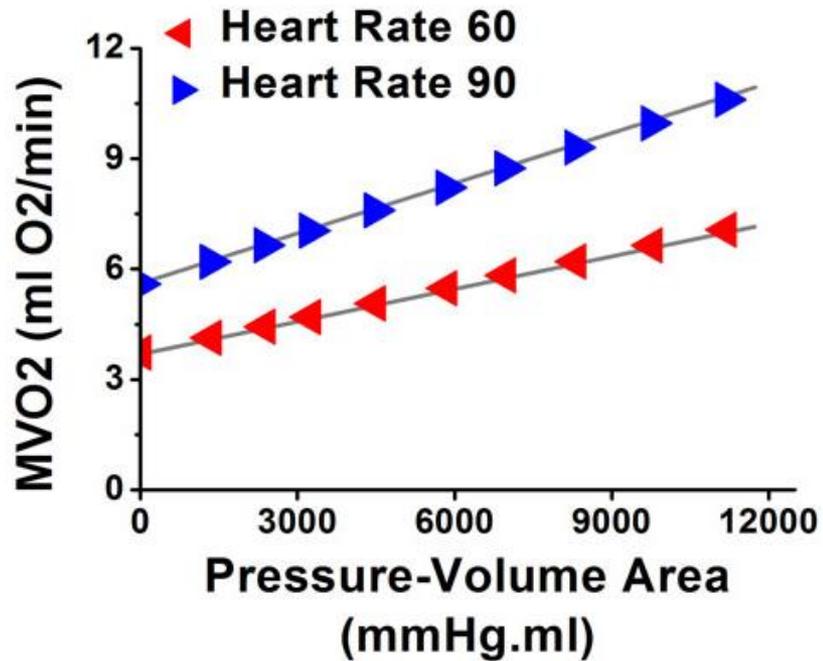
良い心臓

- SVは前負荷依存
- SVは後負荷非依存
- エネルギー効率が良い

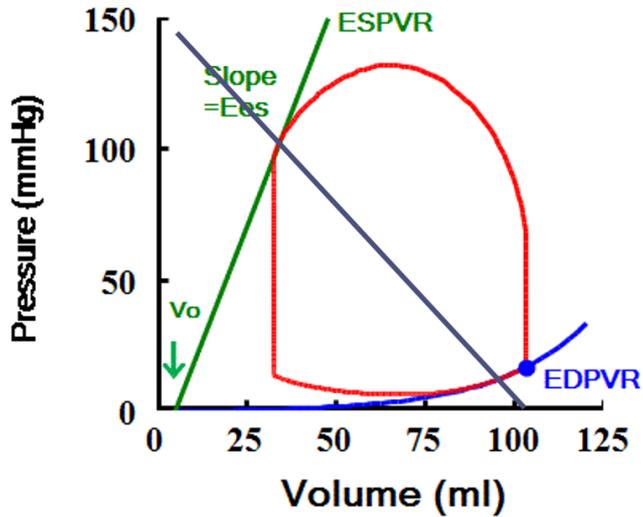
悪い心臓

- SVは後負荷依存
- SVは前負荷非依存
- エネルギー効率が悪い

心拍数の変化



心拍出曲線との関係



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

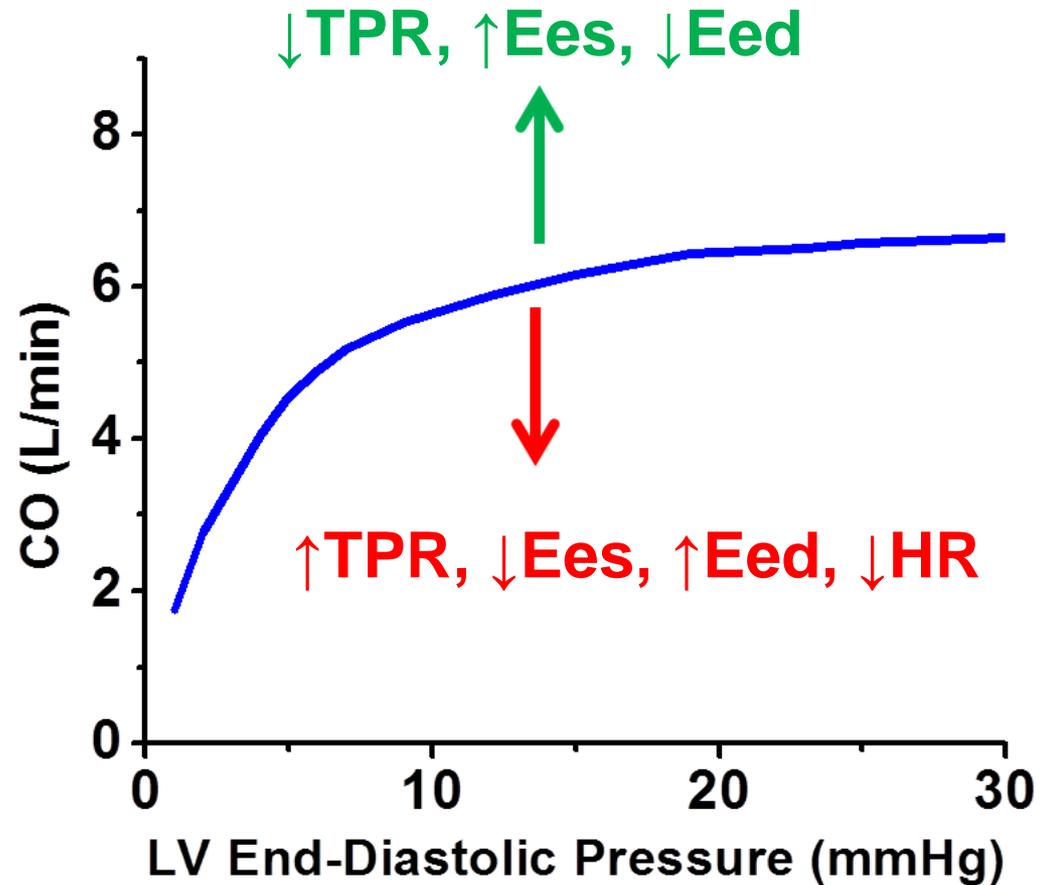
↓

$$CO = SV \times HR$$

EDVをEDVPRの式よりEDPで表す

↓

$$CO = S \times (\log(LAP - F) + H)$$



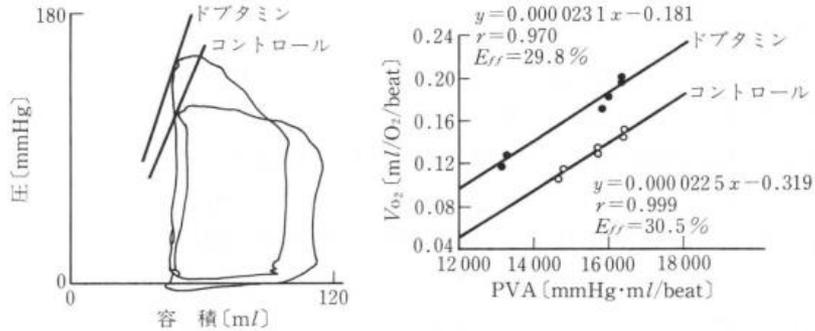
問題③

次のうち、正しい記載はどれでしょう？

1. PVAが同じであれば心筋酸素消費量は同じである。
2. 心収縮が低下した心臓の一回拍出量は前負荷の影響を受けやすい。
3. 心拍数増加は生理的範囲内では心拍出曲線を上方にシフトさせる。
4. 不全心は心臓の総機械的仕事量のうちで外的仕事の割合が大きい。

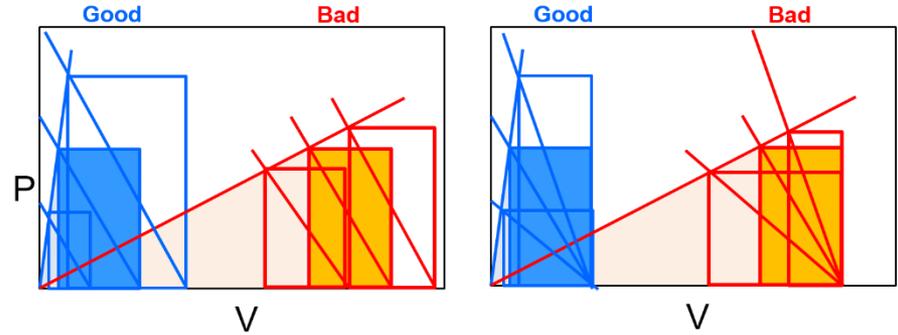
解説

① PVA非依存の酸素消費



PVAが同じでも酸素消費は異なることがある (DOBなど)

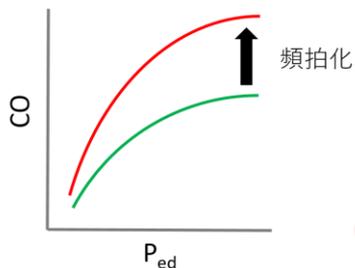
② EesとEaの関係



心収縮力が低下した心臓は後負荷の変化でSVが大きく変化する

③ 心拍出曲線の成り立ち

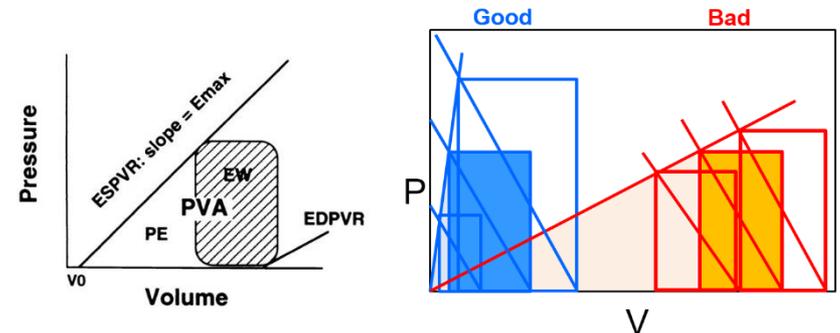
$$CO = \frac{1}{k} \times \frac{E_{es}}{E_{es} / HR + R} \times \{ \log(P_{ed} - F) + H \}$$



k=拡張特性, R=血管抵抗,
F・H=定数

HRは上がるほどにCOは増える

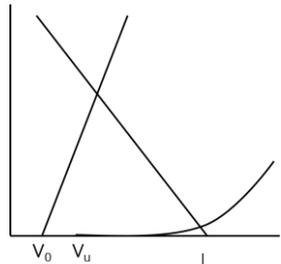
④ 総仕事と外的仕事



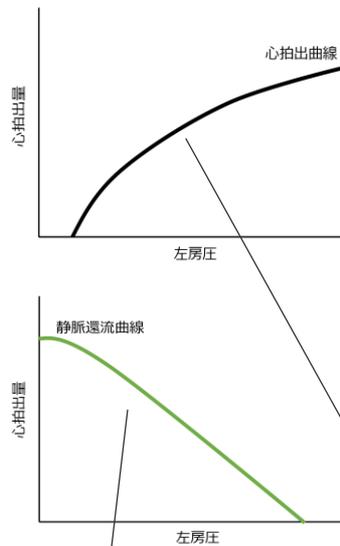
仕事効率 = EW/PVA
不全心は仕事効率が悪い

循環の成り立ち

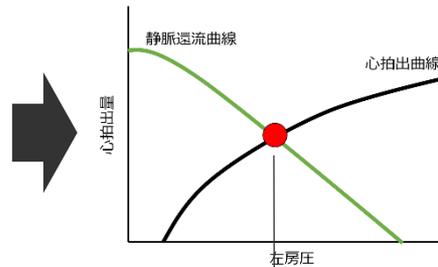
心室と
血管（後負荷）
の性質



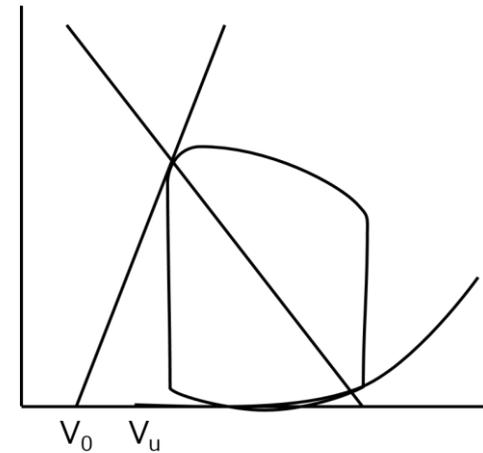
心機能曲線
+
静脈還流



循環平衡



前負荷から E_a を書き入
れてPV loop完成



この時点では前負荷は定義できない！

ここで前負荷が定義

PV loopから心機能曲線は導出される

静脈還流を完璧に推定はできないが、有効循環血液量が多いか少ないかは把握可能

前半の総括

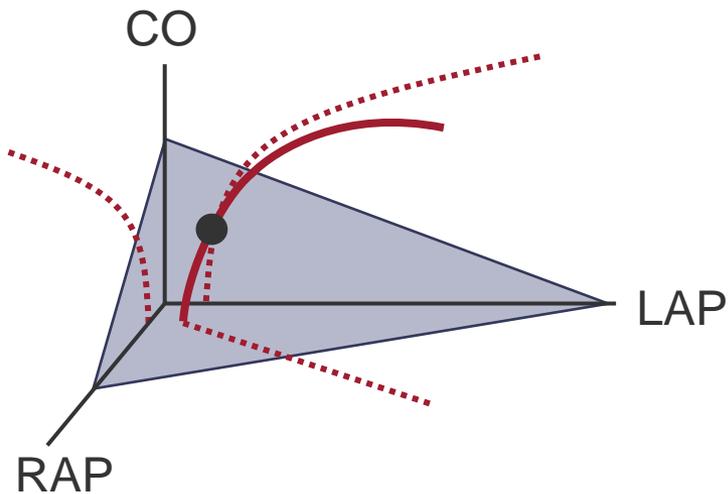
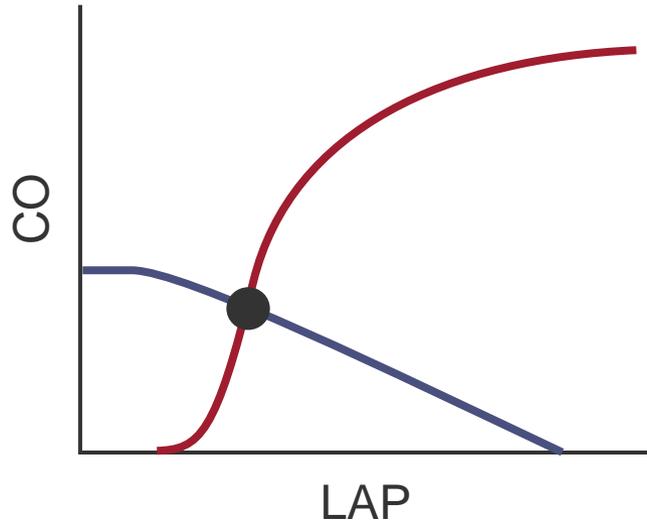
いい心臓の一回心拍出は前負荷依存

悪い心臓の一回心拍出は後負荷依存

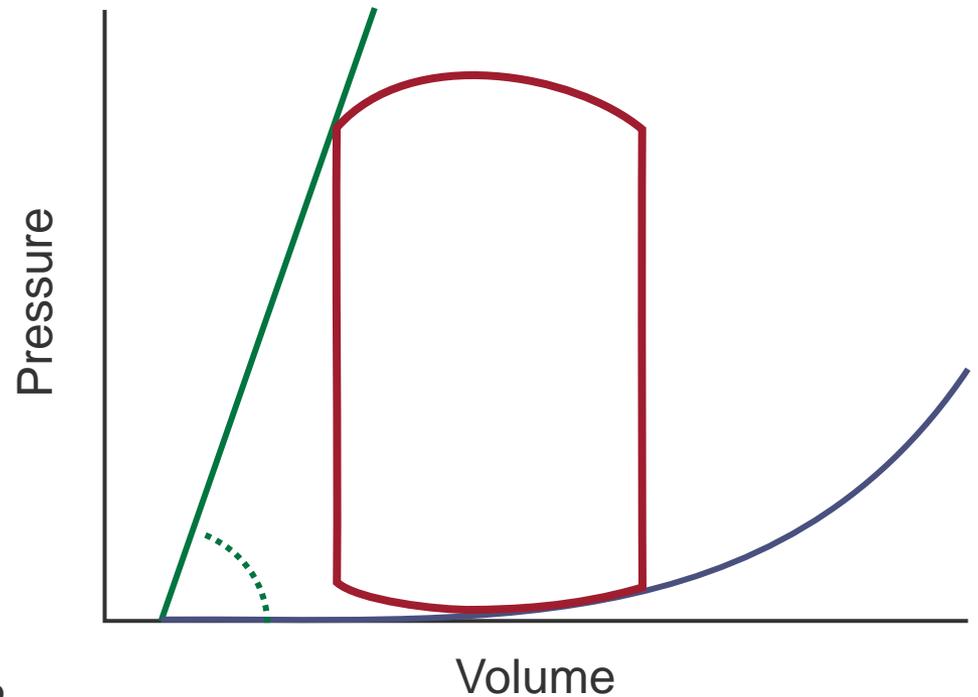
これが説明できたらほぼ網羅している！

循環動態フレームワーク

Circulatory equilibrium



PV loop

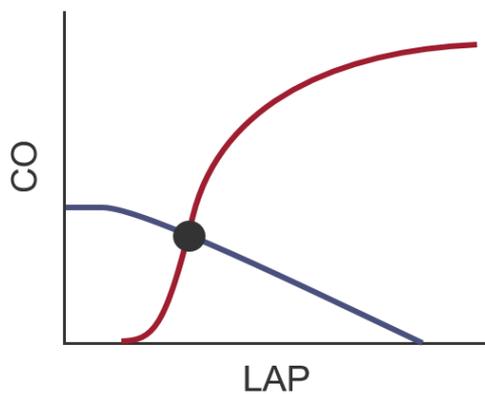
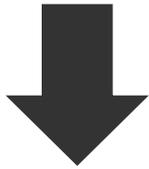


臨床に生かす

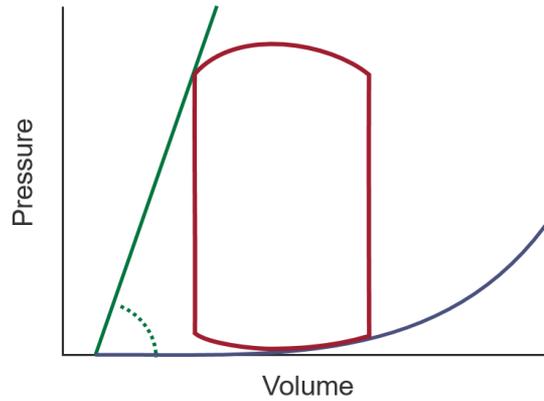
Symptom
Chest Xray
Echocardiogram
Pressure data



SBP 99 mmHg
DBP 68mmHg
MBP 78 mmHg
CVP 11mmHg
PCWP 24 mmHg



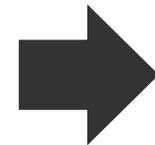
Circulatory equilibrium



PV loop

+

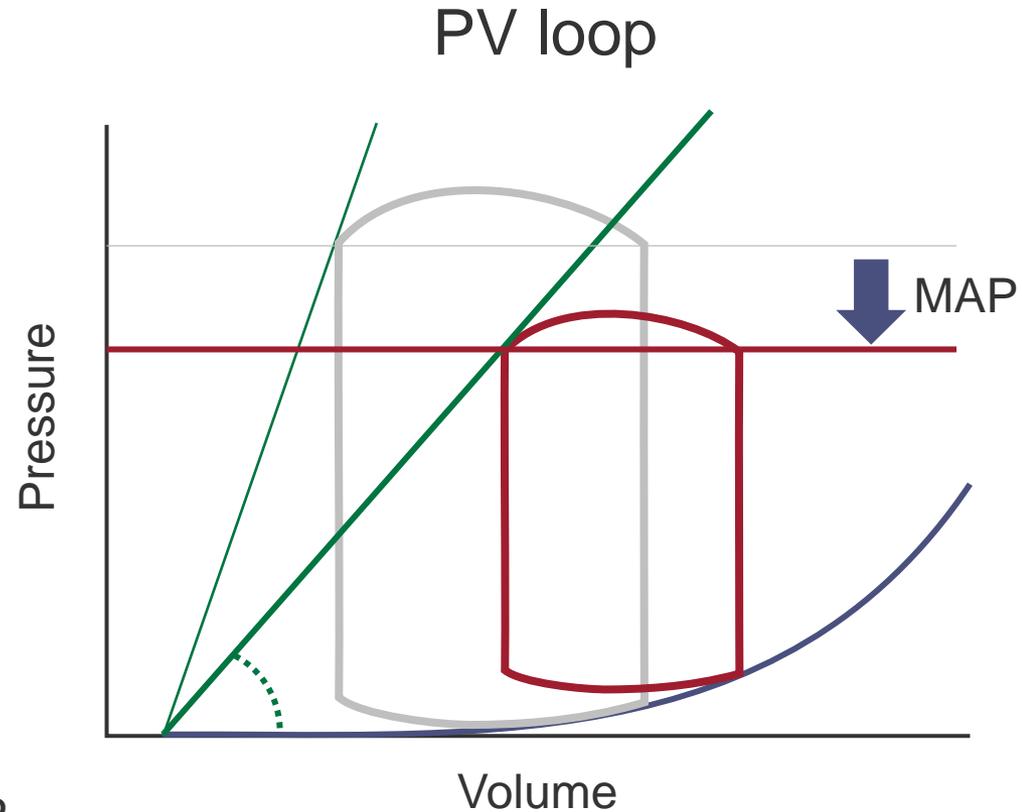
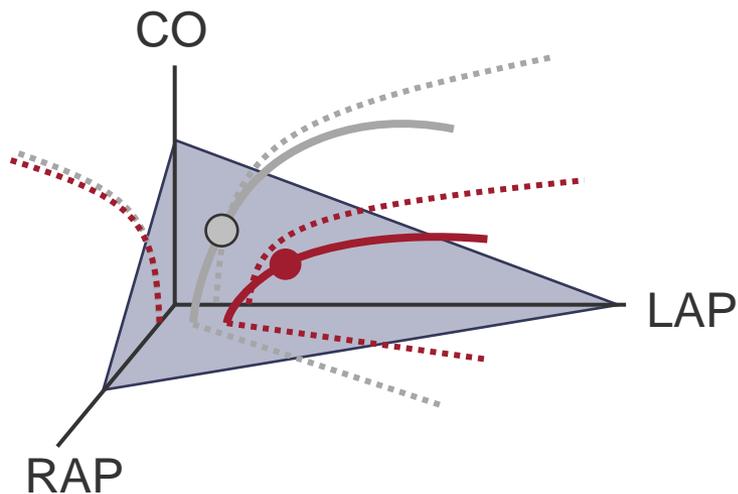
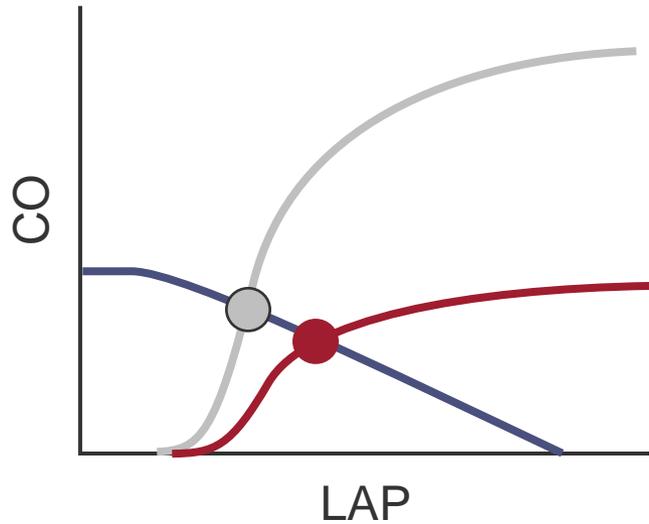
Lactate
Bilirubin
SvO₂



最適解

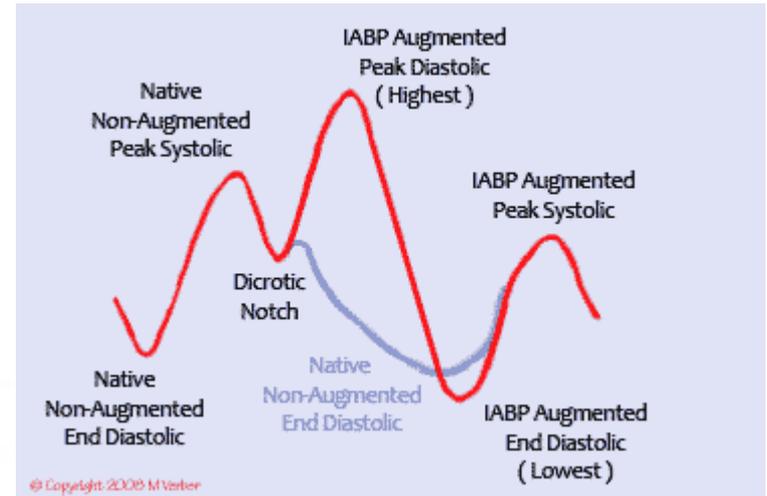
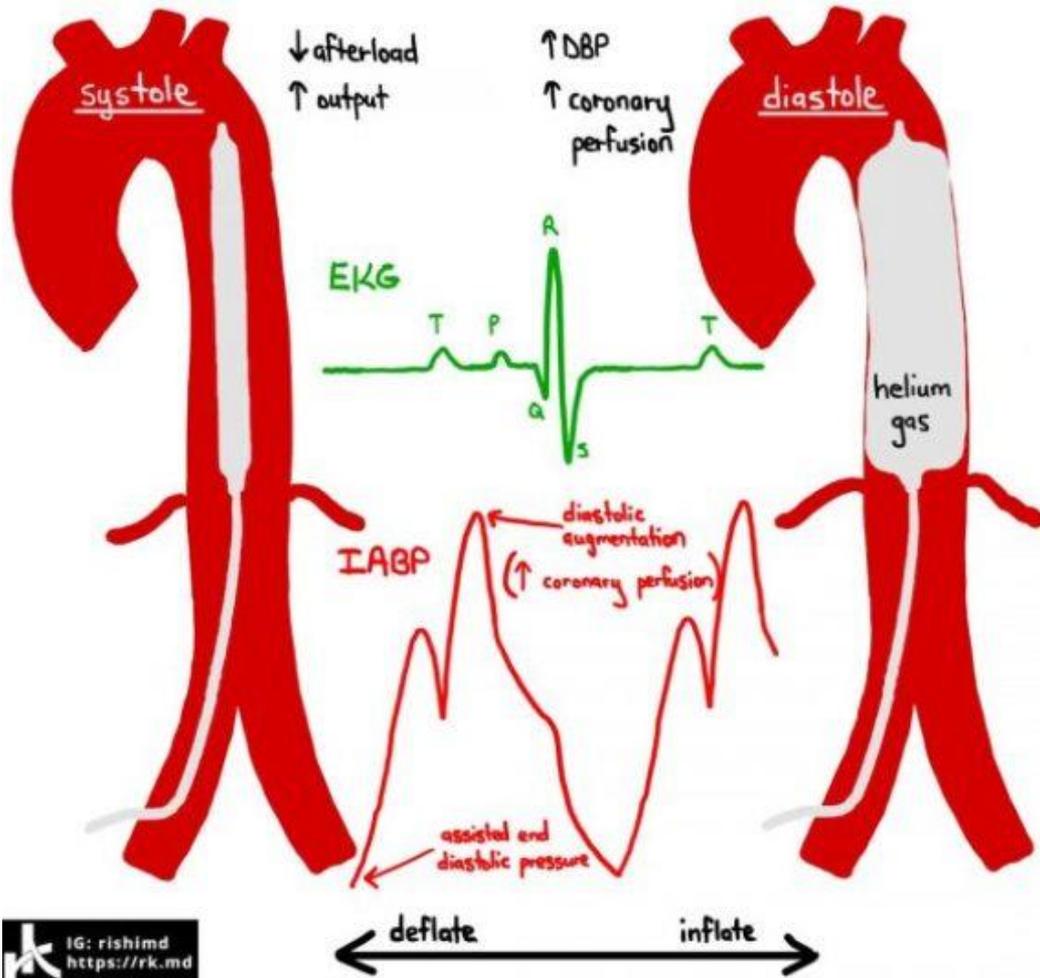
急性左心不全

Circulatory equilibrium



急性に心収縮のみが低下した場合
に予想される動作点の変化

IABP



収縮期：

バルーンがしぼんだ分だけ圧がさがり、心室にとっての後負荷がさがる。

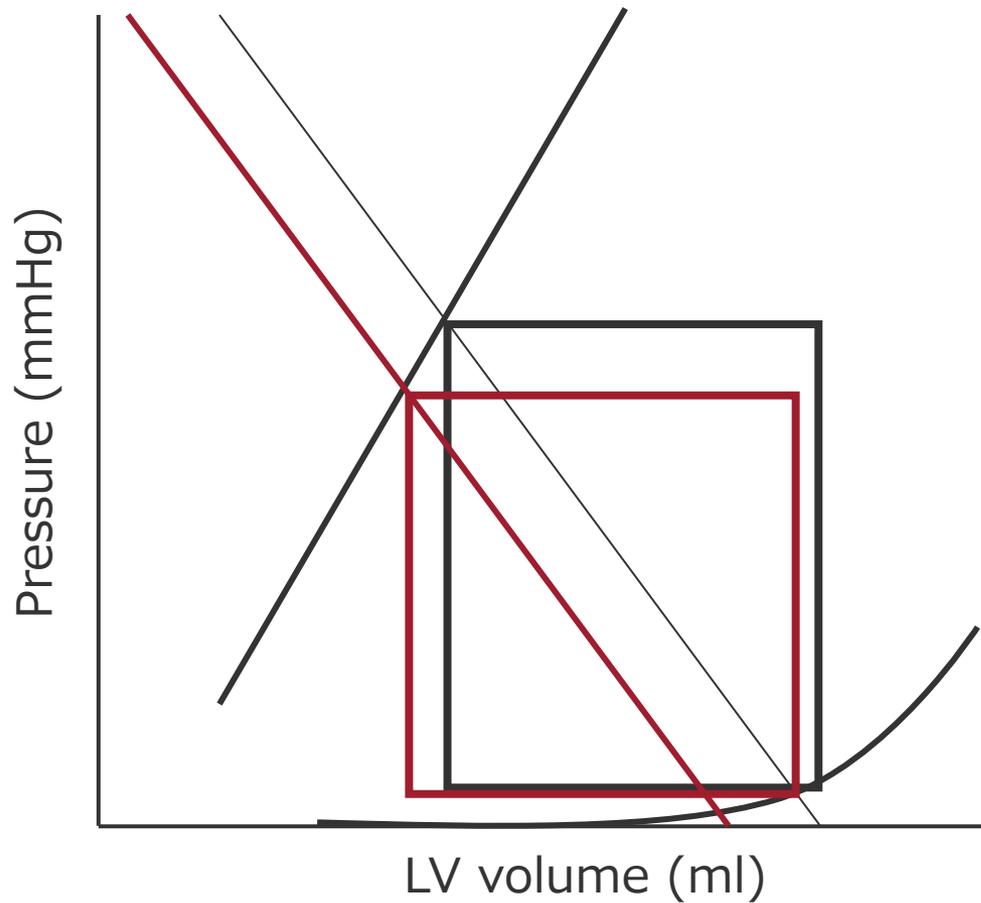
心臓に直接効果

拡張期：

バルーンが開いた分だけ圧があがり、冠血流上昇もしくは維持を介した心機能に影響

冠血流と心機能の関係次第

IABP→PV loop



血管の特性は変わらないが、収縮期の
血圧さがる。急性の瀉血をした感覚？

下がる血圧

=バルーン容量×動脈エラスタンス

心室後負荷: E_a そのものの傾きは変わ
らないはずだが、バルーン分の血圧が
さがるので、 E_a のラインは下へさがる。

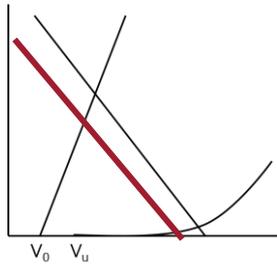


全体としてわずかに心拍出増加があり、
EDVも低下し得る。

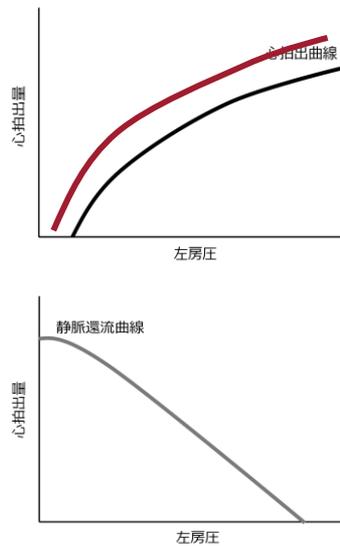
※冠血流増加により心収縮: E_{es} が増加
したら、さらに心拍出増加

IABPの血行動態

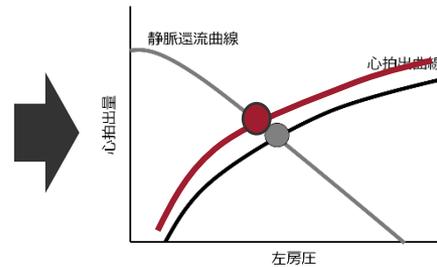
心室と血管
の性質



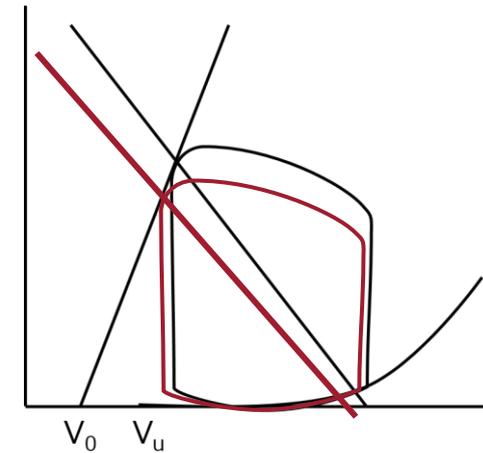
心機能曲線
+
静脈還流



循環平衡



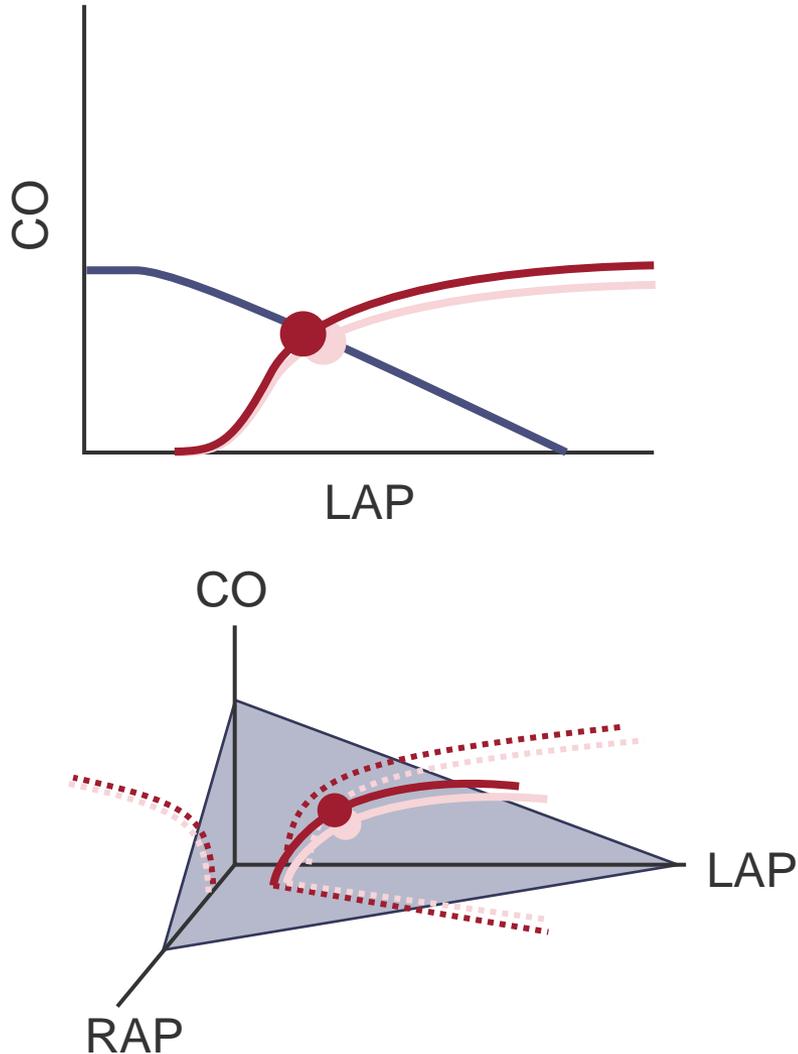
前負荷から E_a を書き
入れてPV loop完成



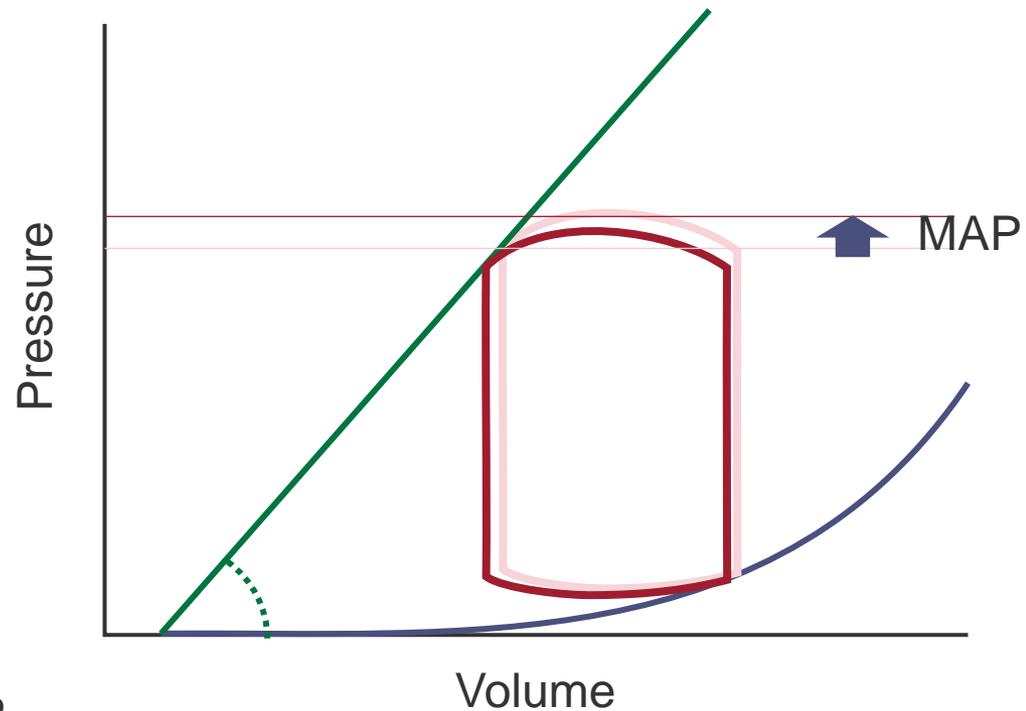
拡張期圧上昇の影響を考慮しなければ、IABPがPV loopを縮小する量はそれほど大きくない

IABPの循環フレームワーク

Circulatory equilibrium



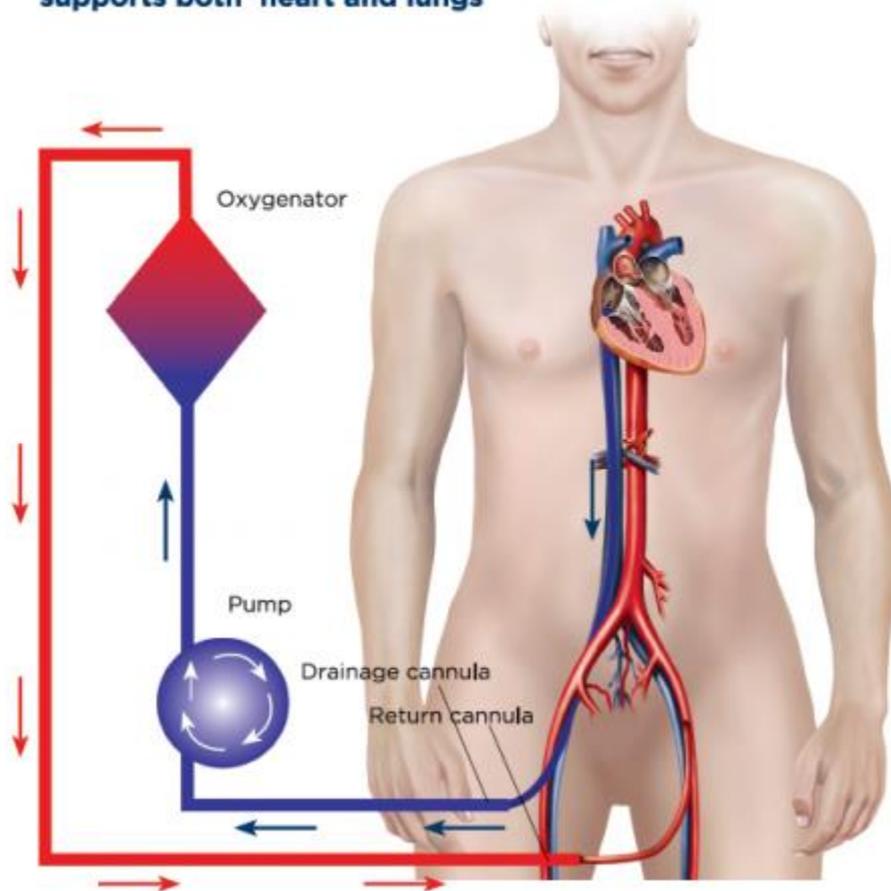
PV loop



VA-ECMO

Veno-arterial (VA) ECMO

supports both heart and lungs



Pulmonary circulation



心臓には直接触らない！

心臓に入ってくる血液を抜いて、その血液を動脈へ送血

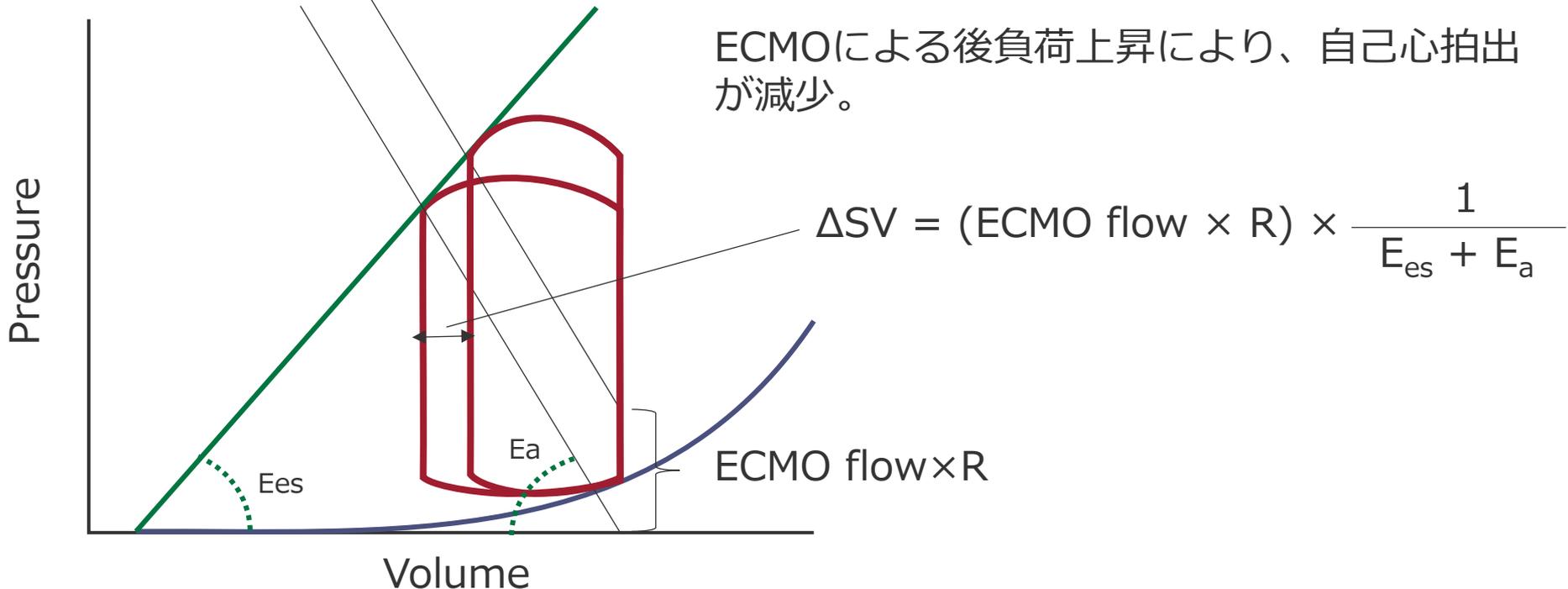
VA-ECMO

ECMOによる後負荷
上昇を少し真面目に
考えてみる

ECMO on
心室からみるとECMO flowによって発生した「圧」が後負荷として追加。

PV loopにおいては E_a ラインが実効的に
ECMO flow×総血管抵抗分だけ上昇。

ECMOによる後負荷上昇により、自己心拍出
が減少。



VA-ECMO

$$CO = HR \times (SV - \Delta SV)$$

$$CO = HR \times SV - HR \times \Delta SV$$

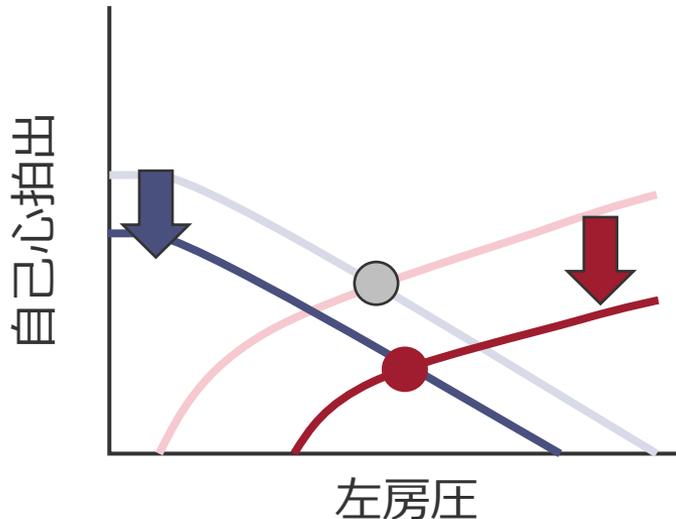
$$CO = HR \times SV - HR \times (ECMO \text{ flow} \times R) \times \frac{1}{E_{es} + E_a}$$

$$CO = HR \times SV - ECMO \text{ flow} \times \frac{E_a}{E_{es} + E_a}$$

$$CO = HR \times SV - ECMO \text{ flow} \times (1 - EF)$$

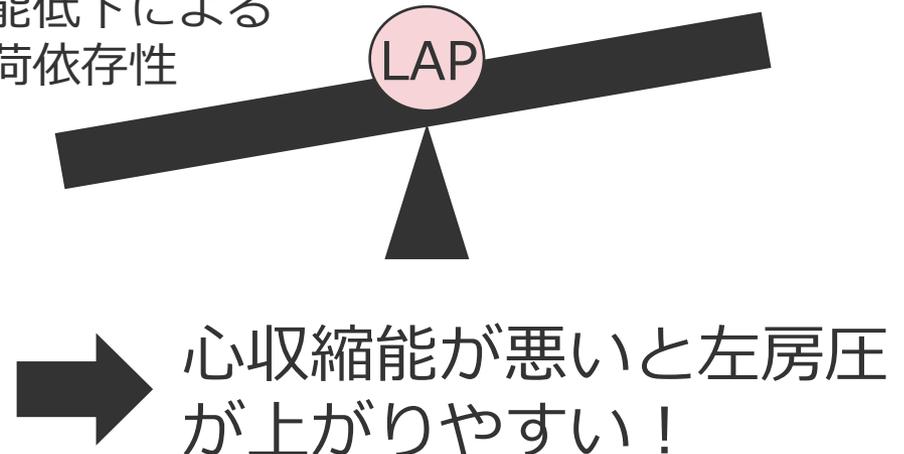
$$\ast E_a = HR \times R \quad \ast EF = \frac{E_{es}}{E_{es} + E_a}$$

ECMOは(1-EF)×ECMO flow分心拍出
曲線を下げる！
=心機能が悪いほどに自己心拍出↓



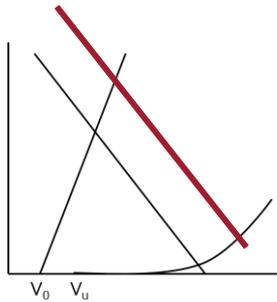
心機能低下による
後負荷依存性

ECMOによる脱血

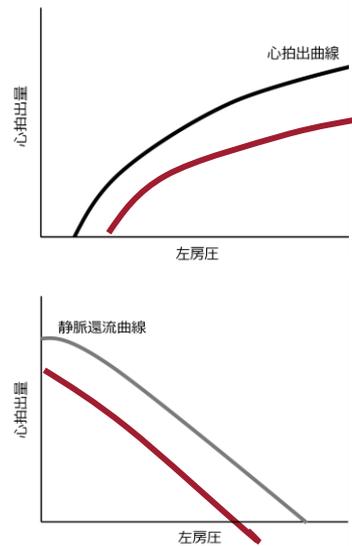


VA-ECMOの血行動態

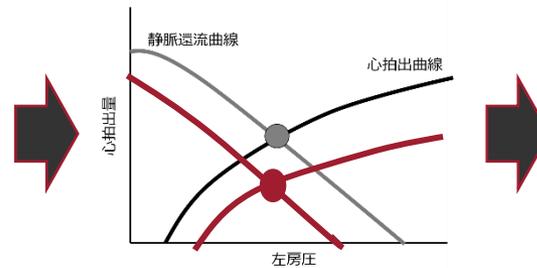
心室と血管
の性質



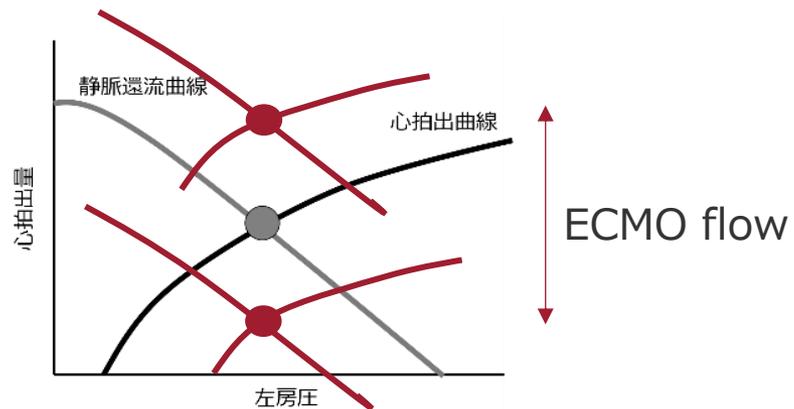
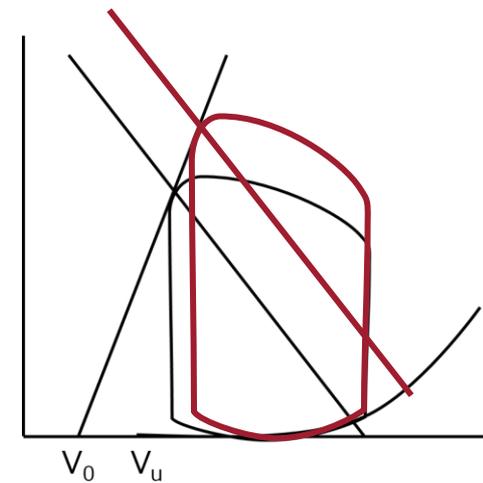
心機能曲線
+
静脈還流



循環平衡

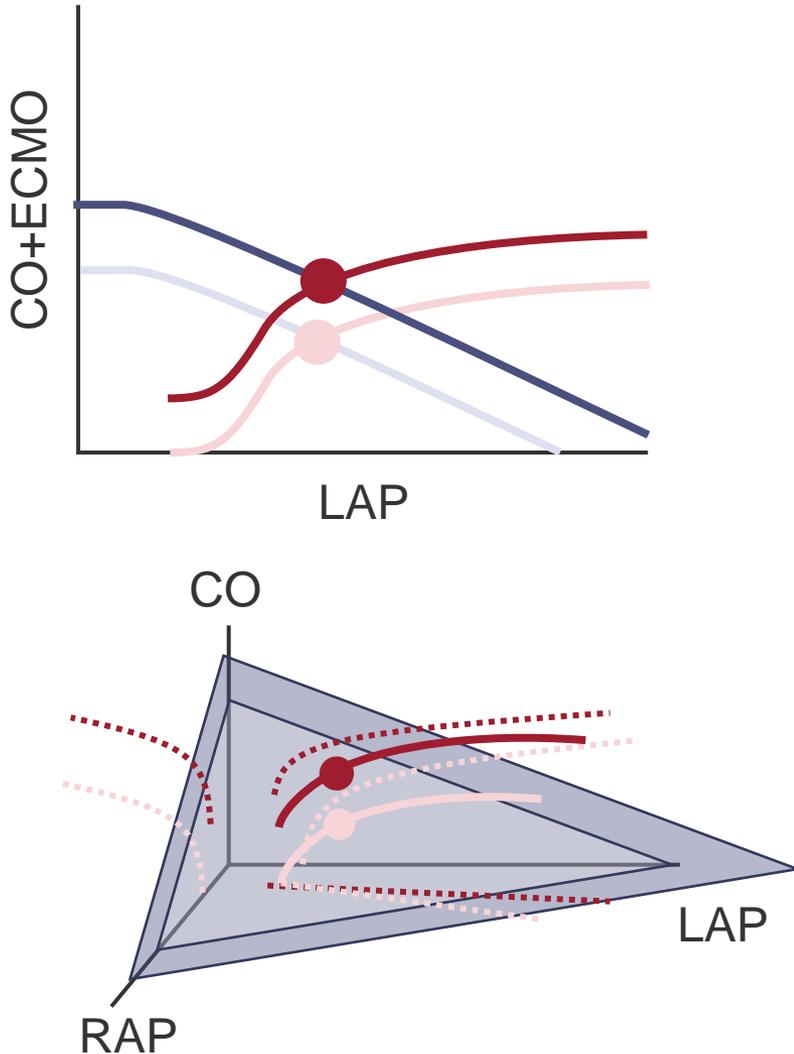


前負荷から E_a を書き
入れてPV loop完成

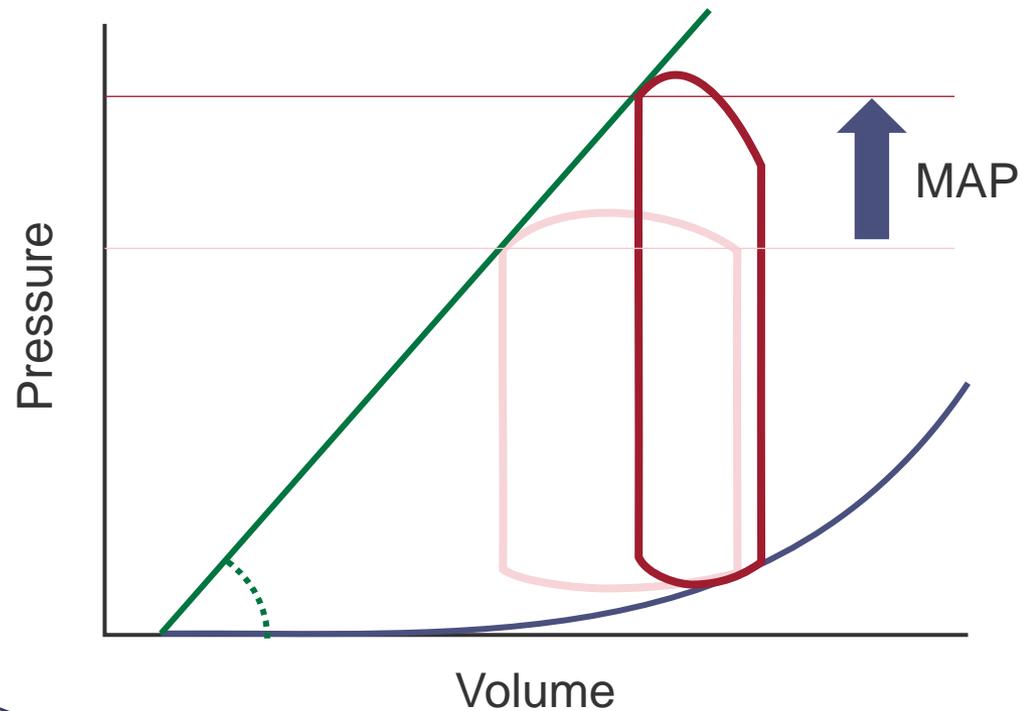


VA-ECMOの循環フレームワーク

Circulatory equilibrium

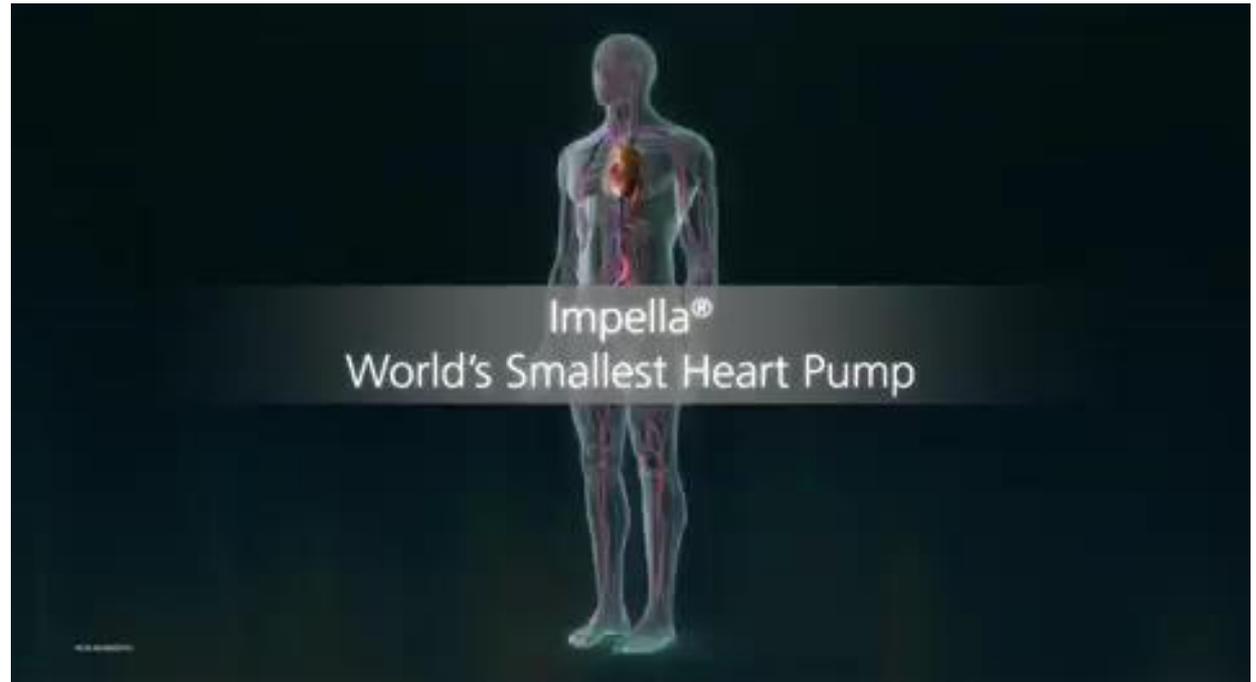
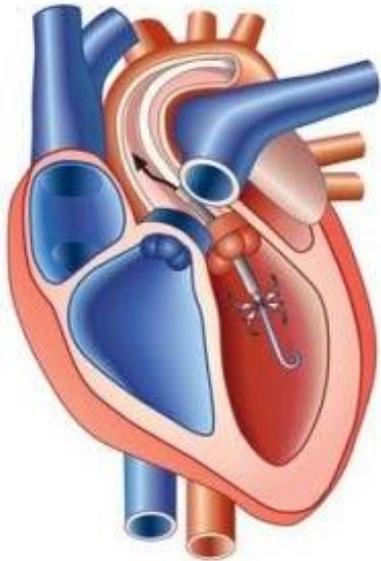


PV loop



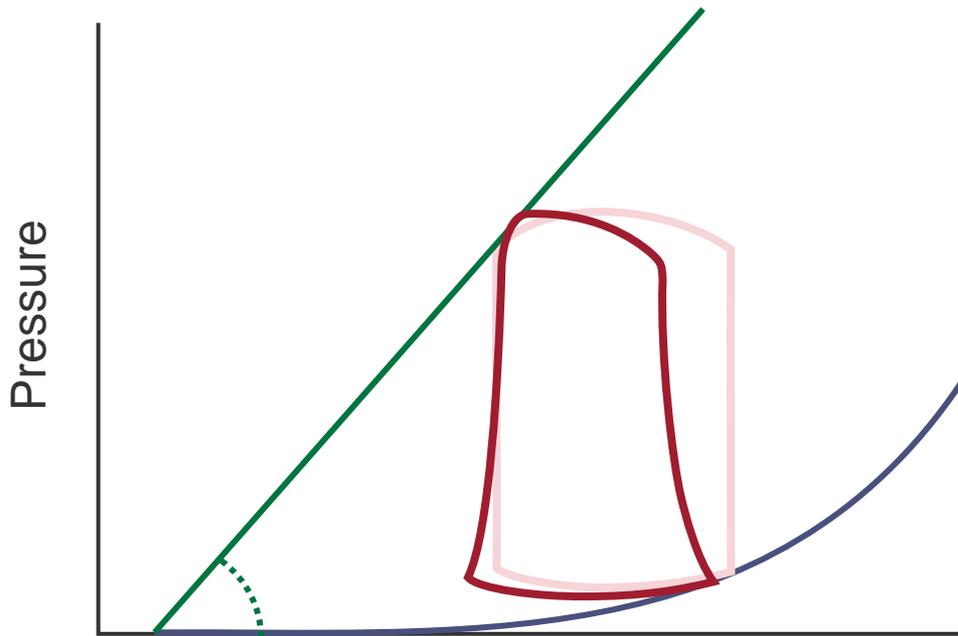
ECMO increases CO and AP.
While, ECMO increases PVA.

Impella

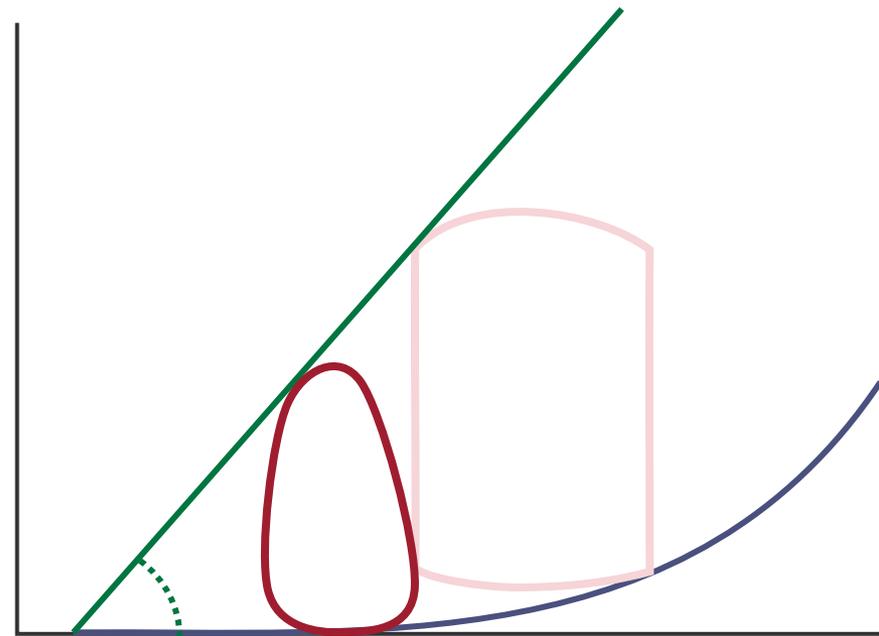


Impella in PV loop

Partial support

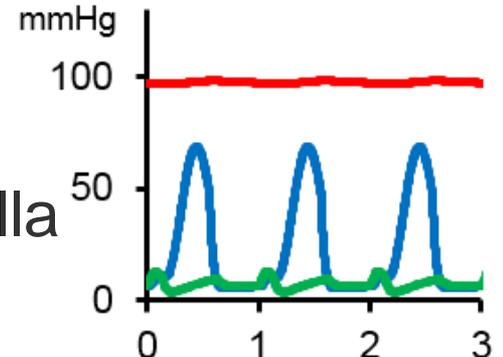
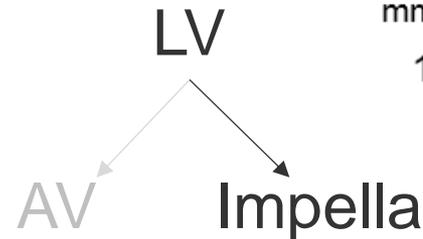
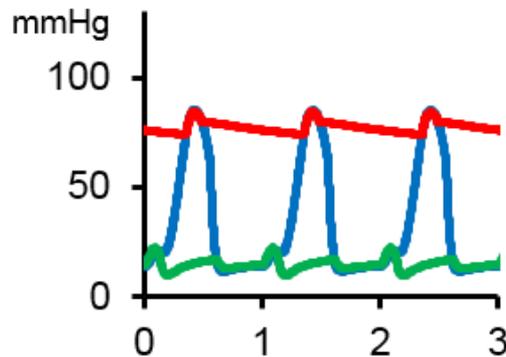
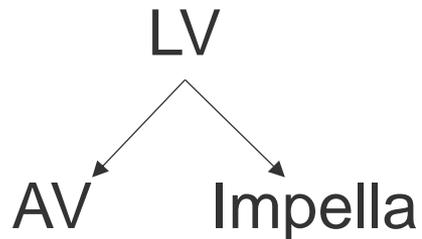


Total support

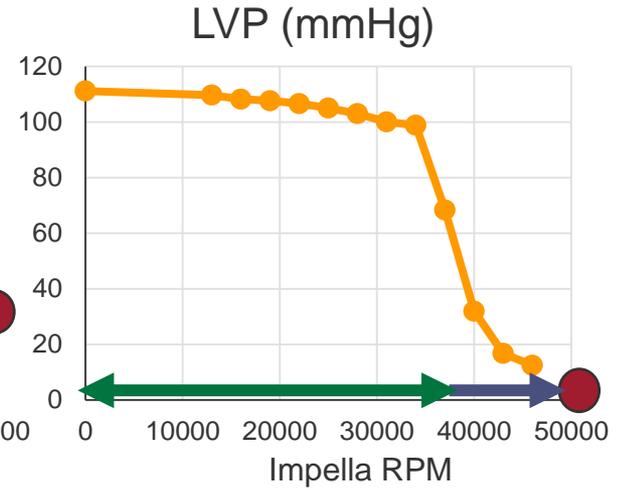
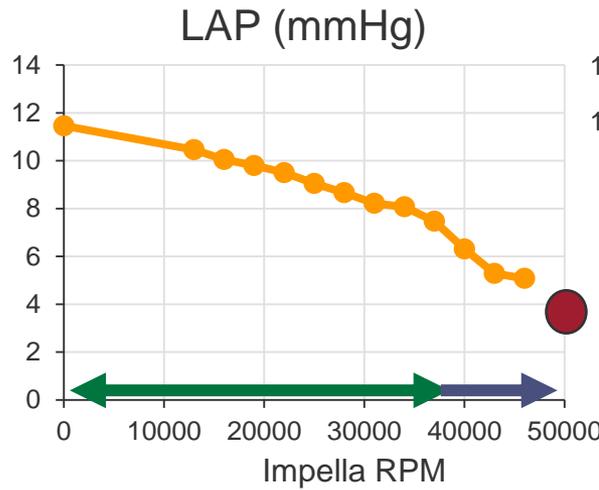
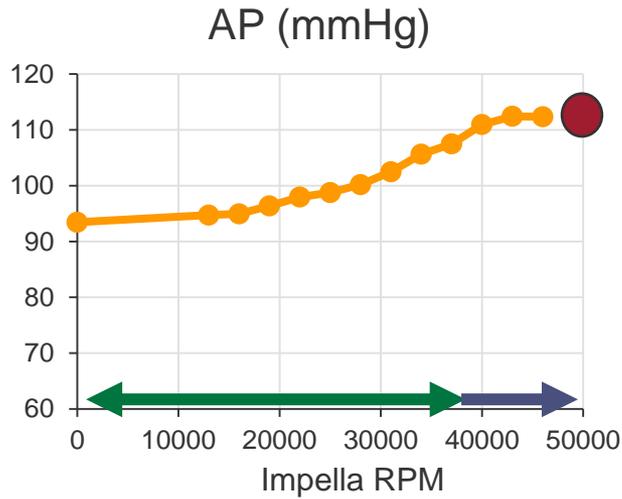


Volume

Volume



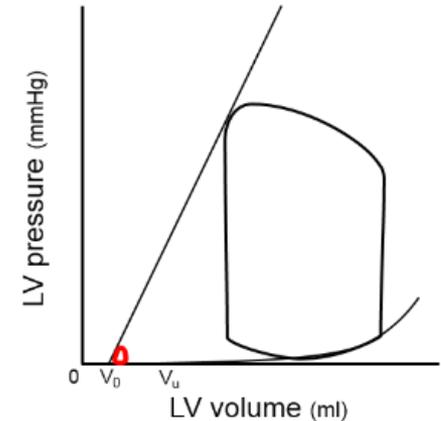
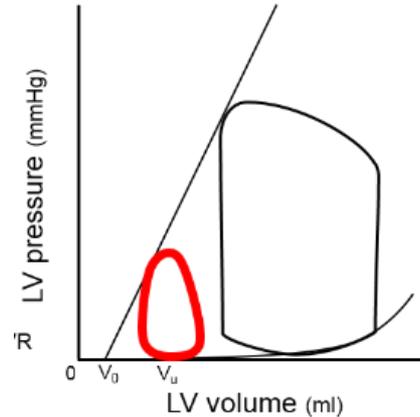
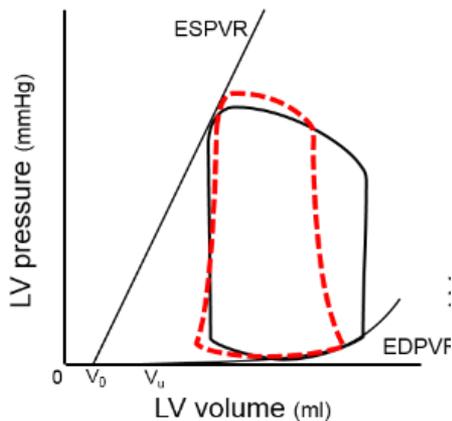
Impella回転数と血行動態



Partial support
(p-Impella)

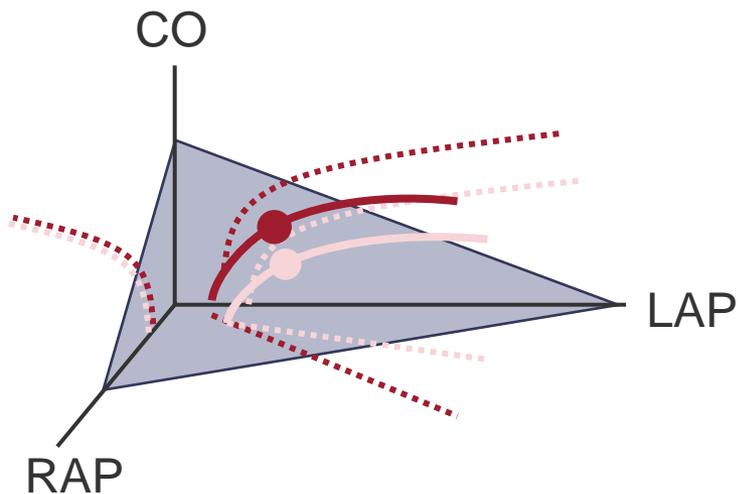
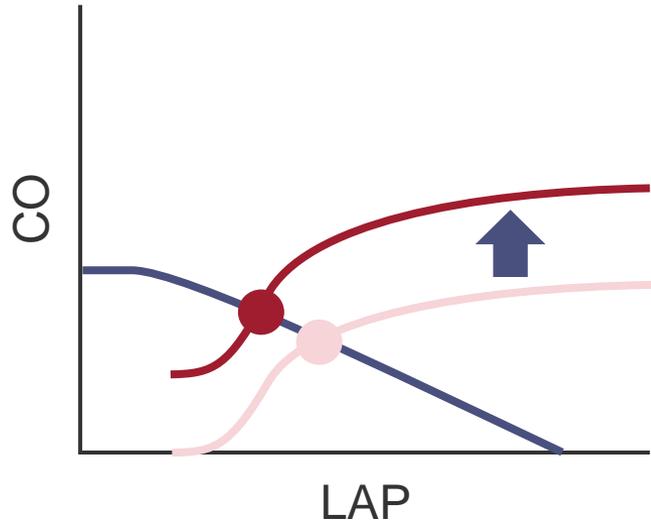
Total support
(t-Impella)

Total unloading

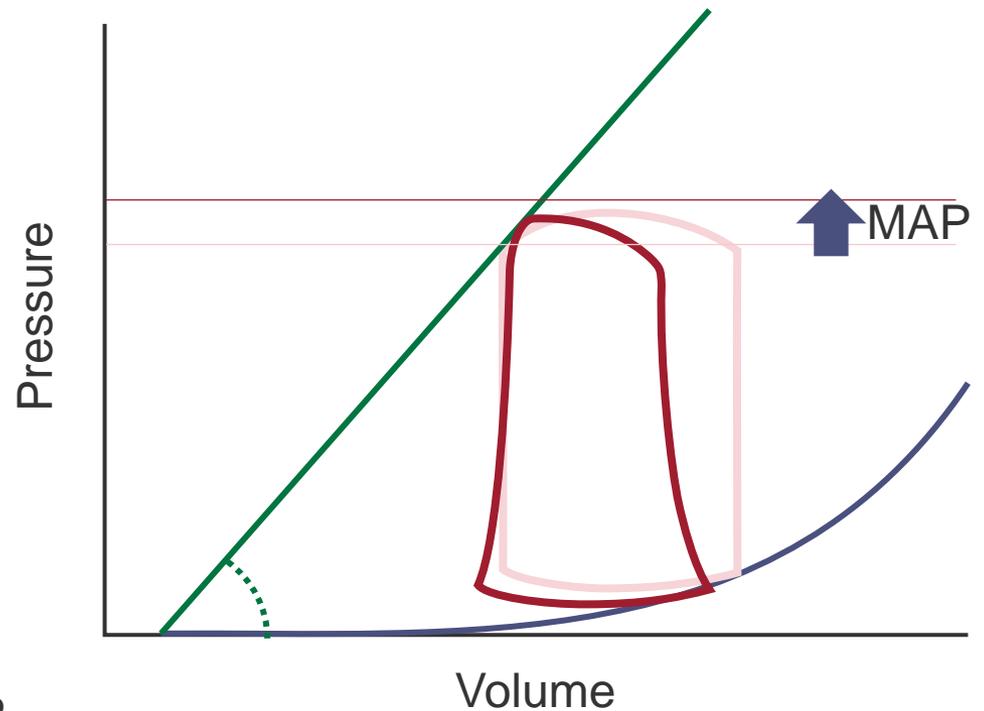


Partial support of Impella

Circulatory equilibrium



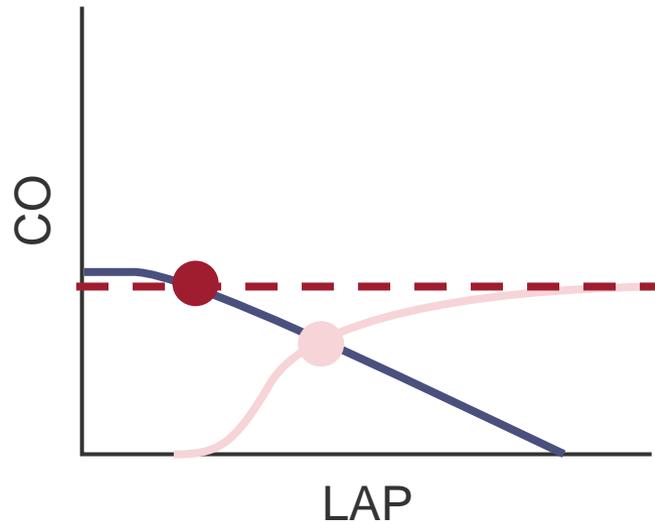
PV loop



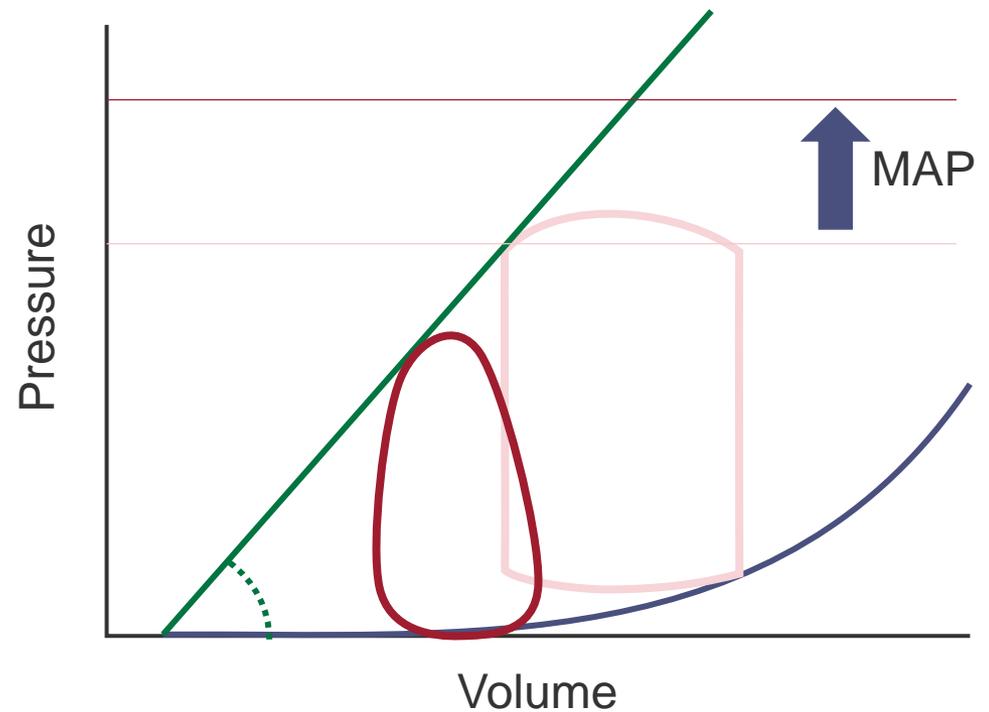
p-Impella reduces PVA.

Total support of Impella

Circulatory equilibrium



PV loop



t-Impella markedly reduces PVA.

問題④

次のうち、自己心拍出が低下しない補助循環デバイスはどれでしょう？

A: IABP

B: PCPS (ECMO)

C: 植込み型LVAD

D: Impella 5.0

問題④

次のうち、自己心拍出が低下しない補助循環デバイスはどれでしょう？

A: IABP

B: PCPS (ECMO)

C: 植込み型LVAD

D: Impella 5.0

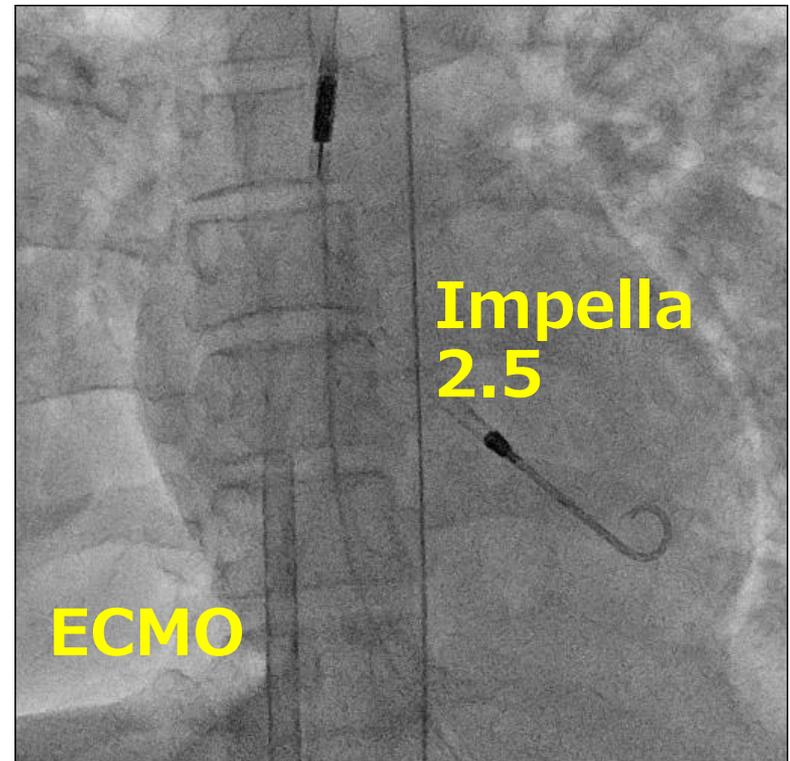
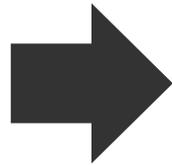
応用編

【主訴】 息切れ

【現病歴】 劇症型心筋症の診断で加療開始

【Vital】 カテ時 HR 144/min, SpO2 80%台 (mask 10L), BP 131/86 mmHg

【右心カテ】 PCWP a/v/mean 35/27/31 mmHg, PA s/d/mean 43/38/40 mmHg
CVP21 mmHg, CO/CI 3.7/2.2 L/min, SVO₂ 37%



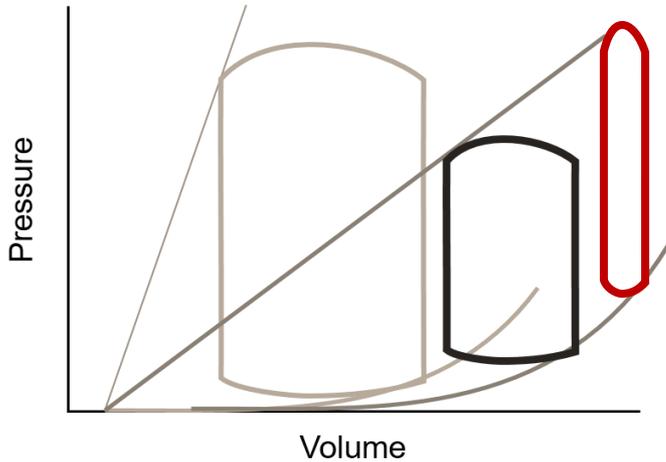
Dr. Nakata



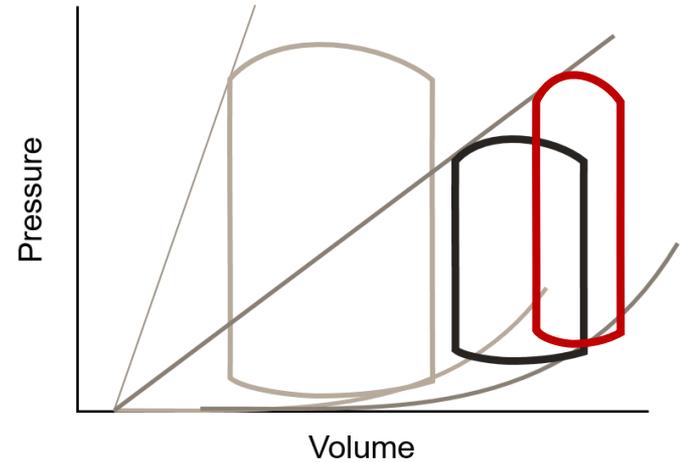
問題⑤

この症例でECPELLAとなった直後のPV loopはどのようになるでしょうか？

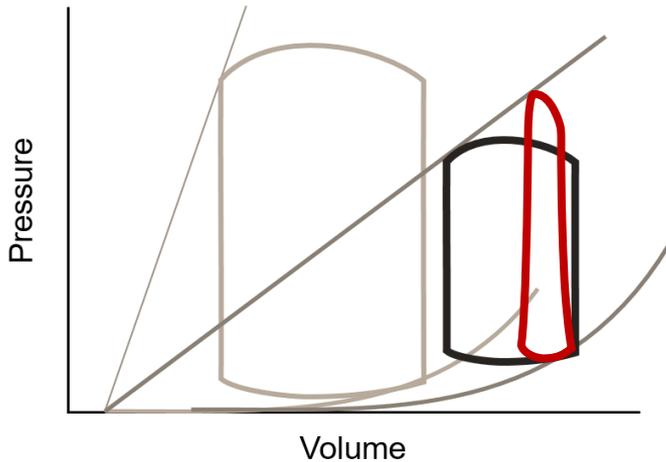
①



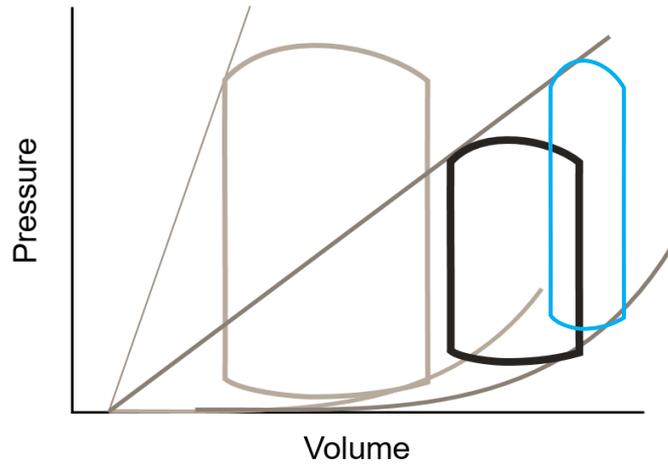
③



②



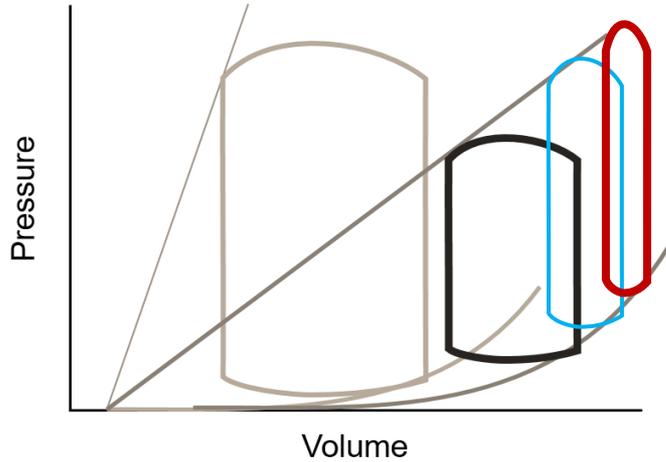
ECMOだけいれると



答えは②

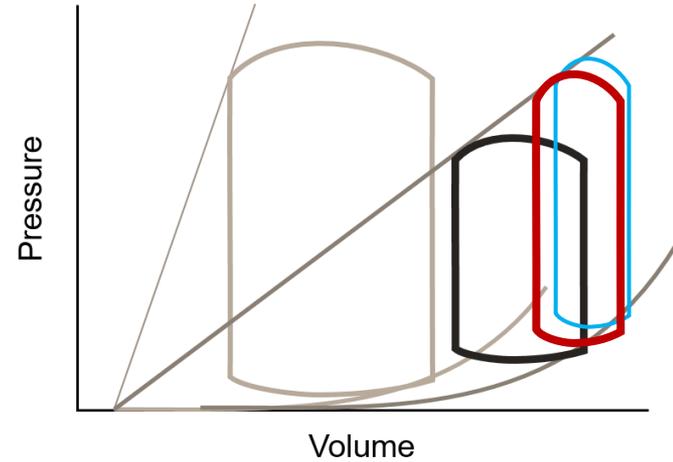
①

ECMO↑



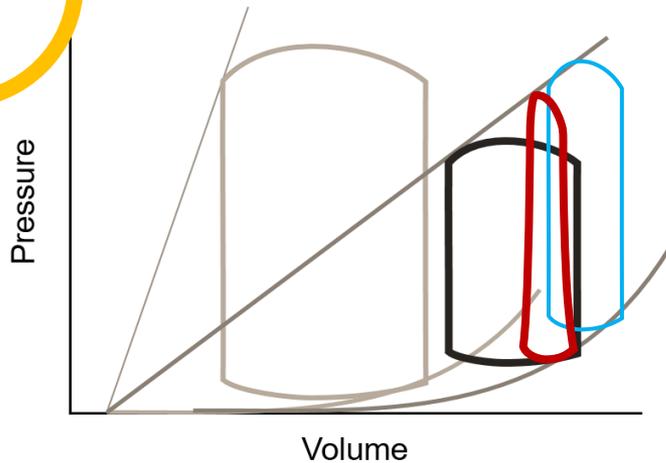
③

ECMO+IABP



②

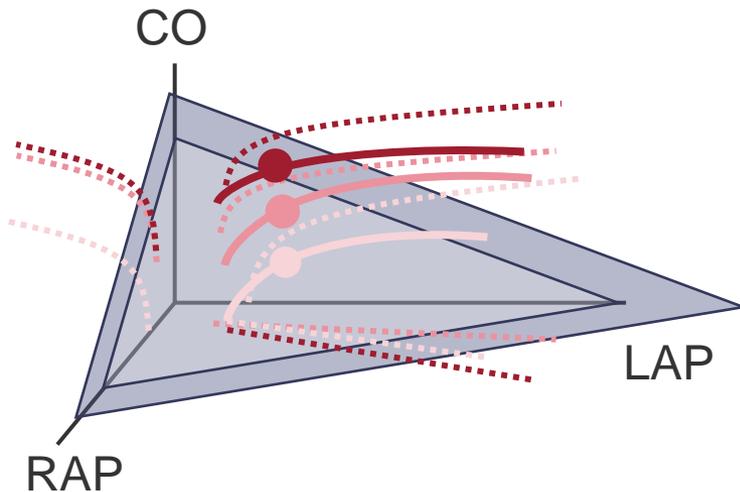
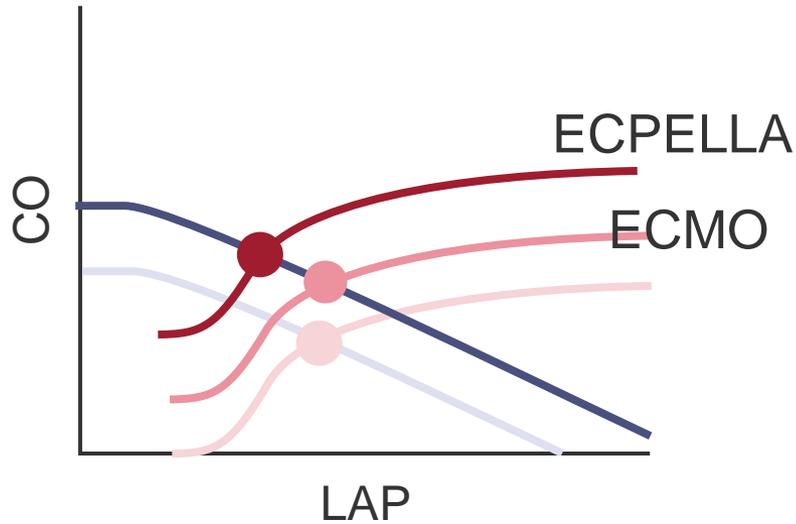
ECPELLA



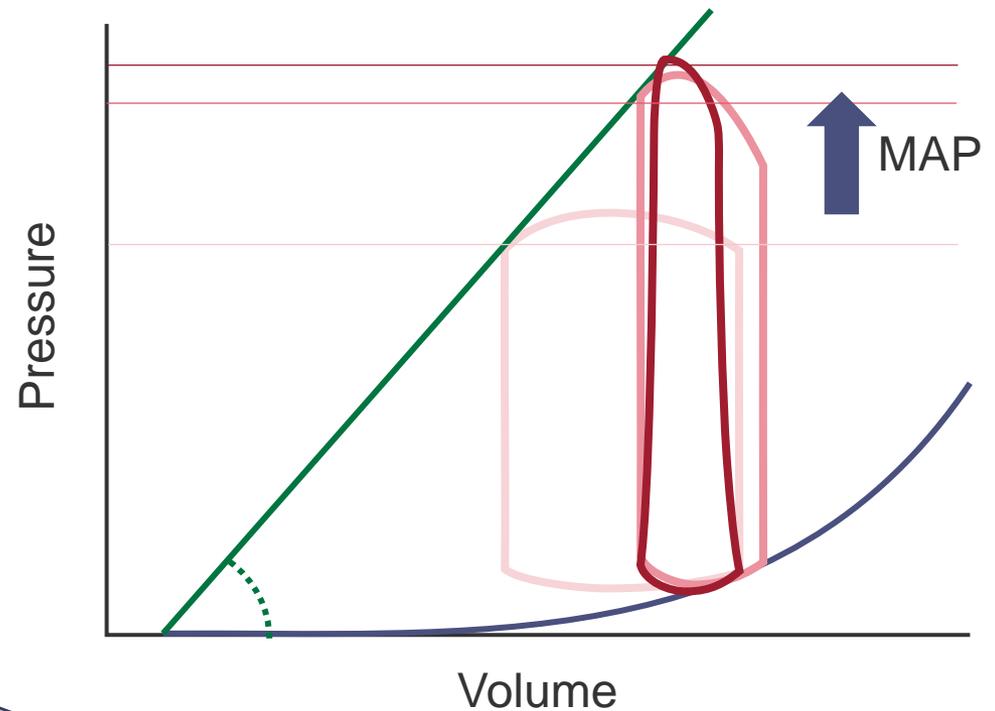
極論すると、、、
ECMOの次の手は
3パターン！

Partial support of ECPELLA

Circulatory equilibrium



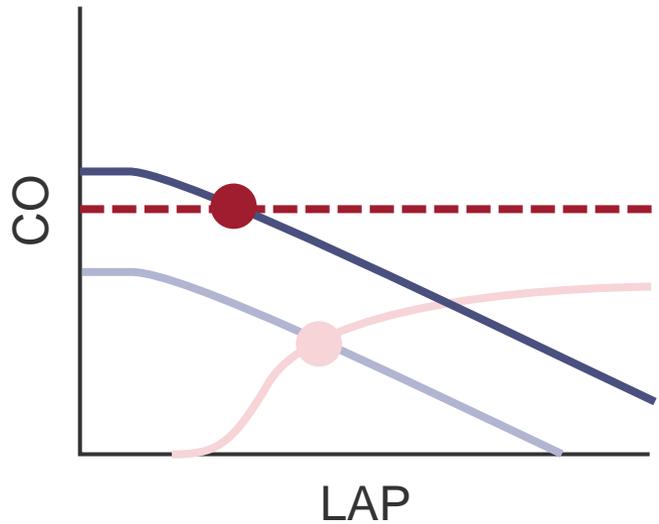
PV loop



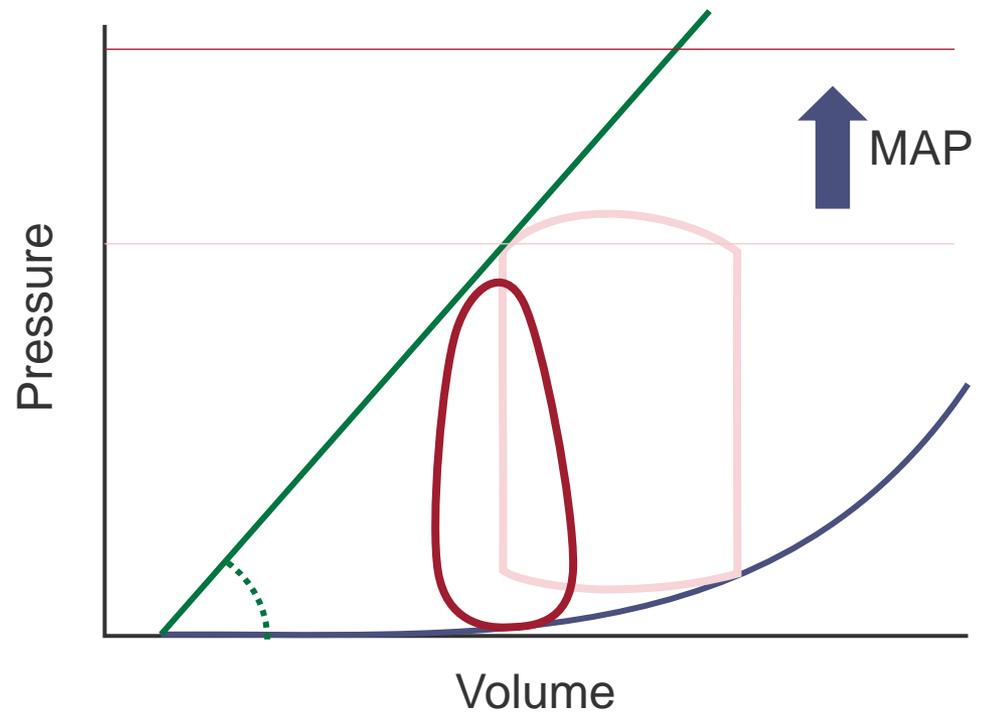
Native cardiac output (+)

Total support of ECPELLA

Circulatory equilibrium



PV loop



Native cardiac output (-)

後半のサマリ

ECMOはLAPが上昇し得る

ImpellaはPVAが最小化できる

これが説明できたらほぼ網羅している！