

循環動態アカデミー SUMMER CAMP 2021

集え、循環動態オリンピックへ！

心臓エナジェティクスと補助循環

国立循環器病研究センター
朔 啓太

心臓力学と エナジエティクス

医学博士 菅 弘之・医学博士 高木 都 編著
医学博士 後藤 葉一・医学博士 砂川 賢二 編著



コロナ社

在庫あり

定価

3,850円 (本体3,500円+税)

カートに入れる

? 購入案内

いいね！4

シェア

ツイート

LINEで送る

★ お気に入り

ME教科書シリーズ B-1

心臓力学とエナジエティクス

日本生体医工学会 編 / 菅 弘之 国立循環器病センター研究所名誉所長 医博 編著 / 高木 都 奈良県立医科大学名誉教授 医博 編著 / 後藤 葉一 公立八鹿病院院長 医博 編著 / 砂川 賢二 循環制御システム研究機構理事 医博 編著

心臓機能の研究を国際レベルで推進してきた4名の編著者が新進気鋭の共同研究者と共にこれまでの研究成果をわかりやすくまとめたものである。焦点は心臓ポンプ機能の要素還元的な詳細ではなく、統合的な枠組みに合わされている。

ジャンル → ME・医学・福祉 > ME(生体医工学) > ME教科書シリーズ

発行年月日 | 2000/11/10

✉ ご意見・ご感想はこちら

判型 | B5

ページ数 | 216ページ

ISBN | 978-4-339-07141-2

皆さん伝えたくて私、出版社に再販お願いしました！

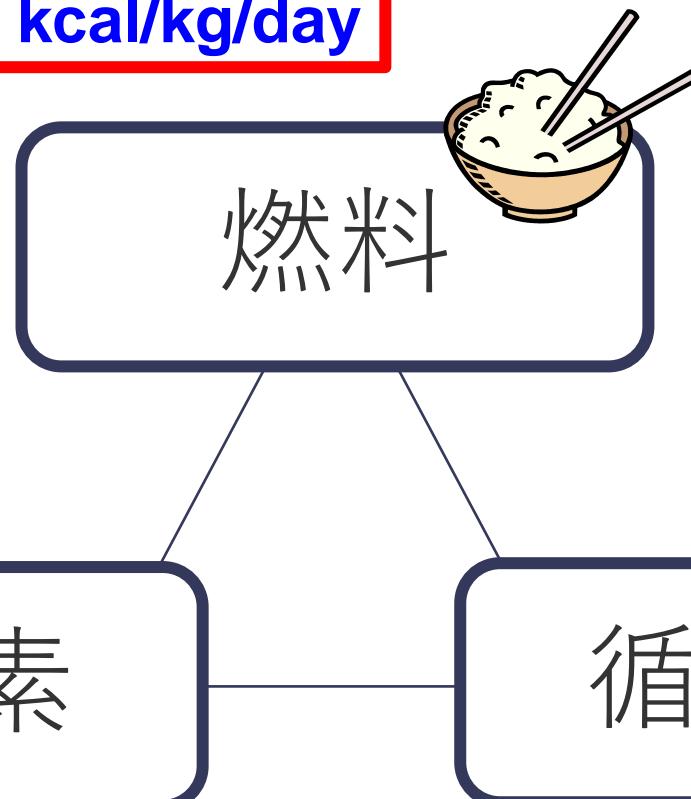
まずは循環のルールから、、、

師匠から習った命のトライアングル

- 基礎代謝における O_2 必要量
 $1mlO_2 = 20J$ のエネルギー產生
 $1.21 \cdot 60 / 20 \approx 3.5ml/kg/min = 1 METS$

3.5 ml/kg/min (1.21W)
210 ml/60kg/min (70W)

25 kcal/kg/day

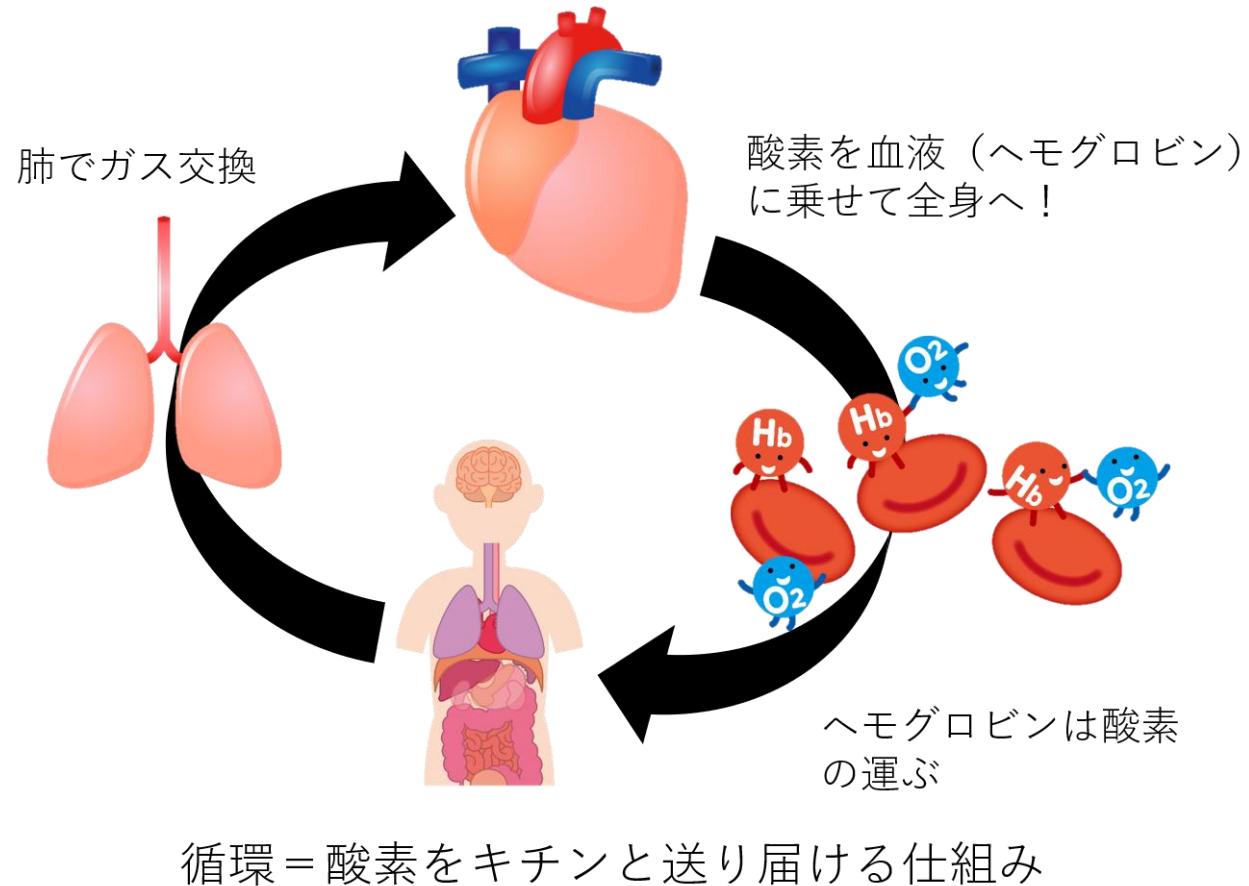


- 代謝 = $25kcal/kg/day$ から Wを求める
 $25 \cdot 10^3 \cdot 4.18 / (86.4 \cdot 10^3) = 1.21W/kg$
- 体重 60 kgだと
 $1.21 \cdot 60 = 72.6 \sim 70W$

70 ml/kg/min
4.2 L/min/60kg

- Hb 1g は $1.34 ml$ の酸素と結合
- Hb 15 g/100ml を酸素で飽和すると
 $\rightarrow 15 \times 1.34 \approx 20 ml/100 ml$ の酸素と結合
- $S_aO_2 = 100\%, S_vO_2 = 75\%$ とすると、 $3.5 ml/kg/min$ の酸素を供給するためには $3.5 / 5 \times 100$ で $70 ml/kg/min \rightarrow$ 体重 $60 kg$ なら $4.2 L$

循環ってなんだ？

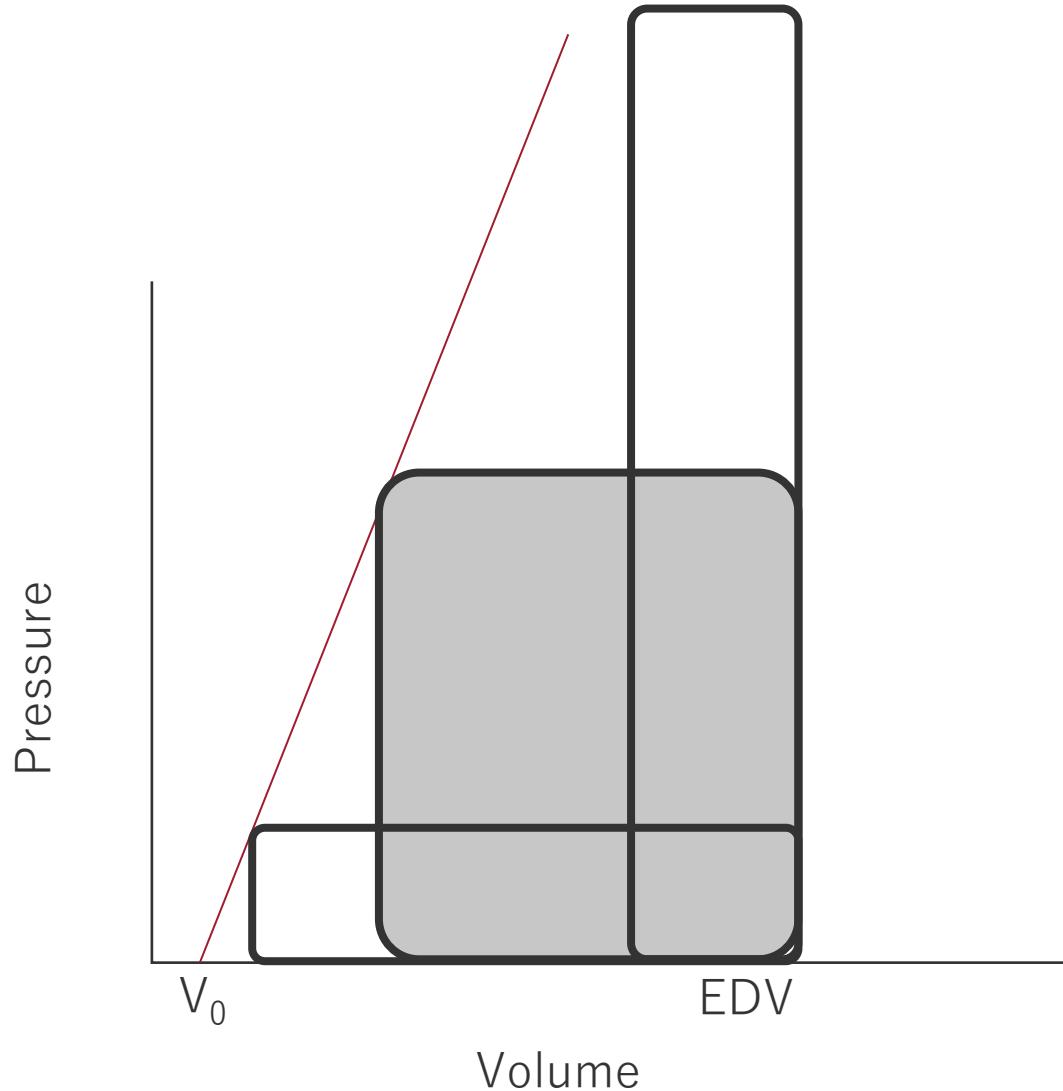


代謝が決まる
↓
必要な食事量が決まる
↓
必要な心拍出が決まる
↓
必要な心機能、心拍数
/ 心臓サイズが決まる

一生で駆出する血液量で近いのは？

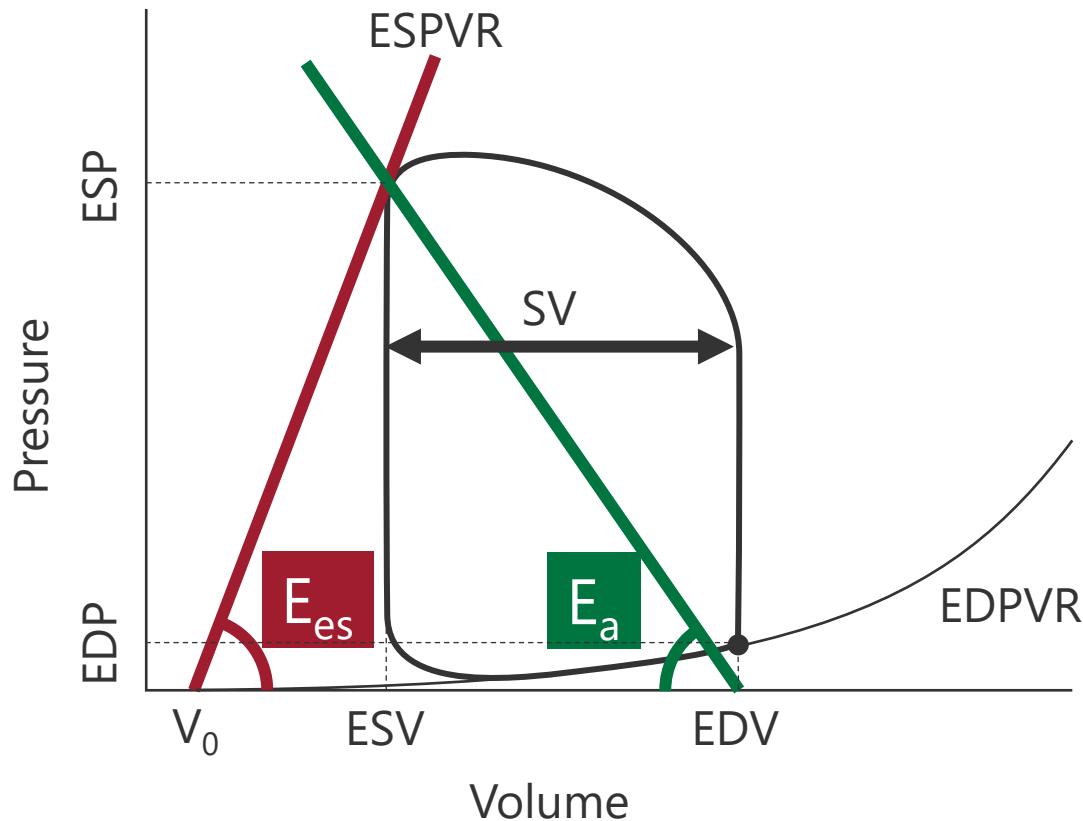
1. 100万L
2. 1000万L
3. 2億L
4. 20億L

心臓は外的仕事をするための臓器
=生きていることは心負荷



心臓の外的仕事
=Loopの中の面積
=1回心拍出量
 $\times 100 \text{ mmHg}$
↓
このループを30億回
描く相当な持久戦が人生
ともいえる

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

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

▼

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

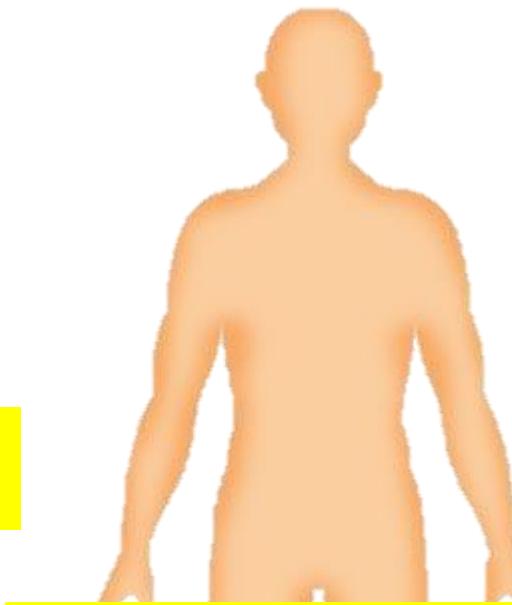
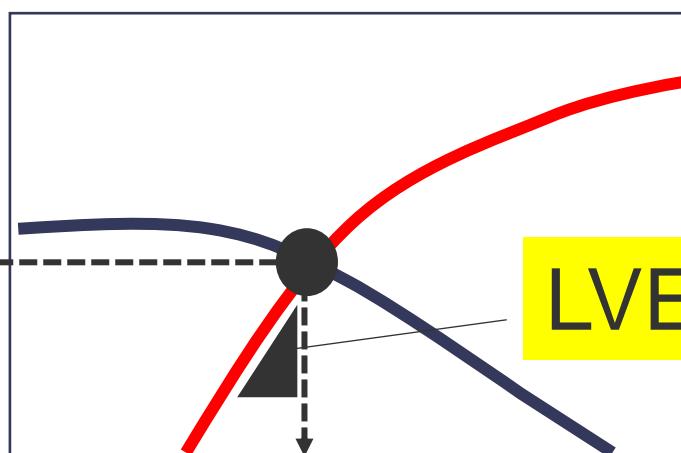
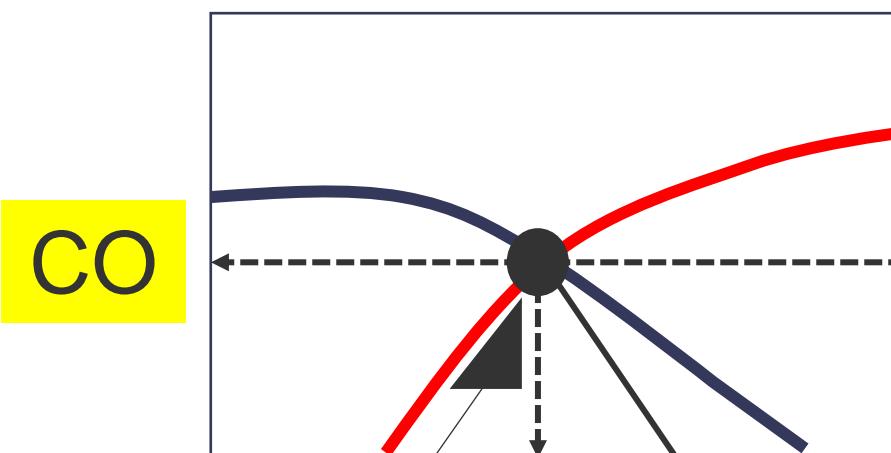
実効的な駆出率 (EF)

循環平衡的に考えると、、、、

Right heart



Left heart

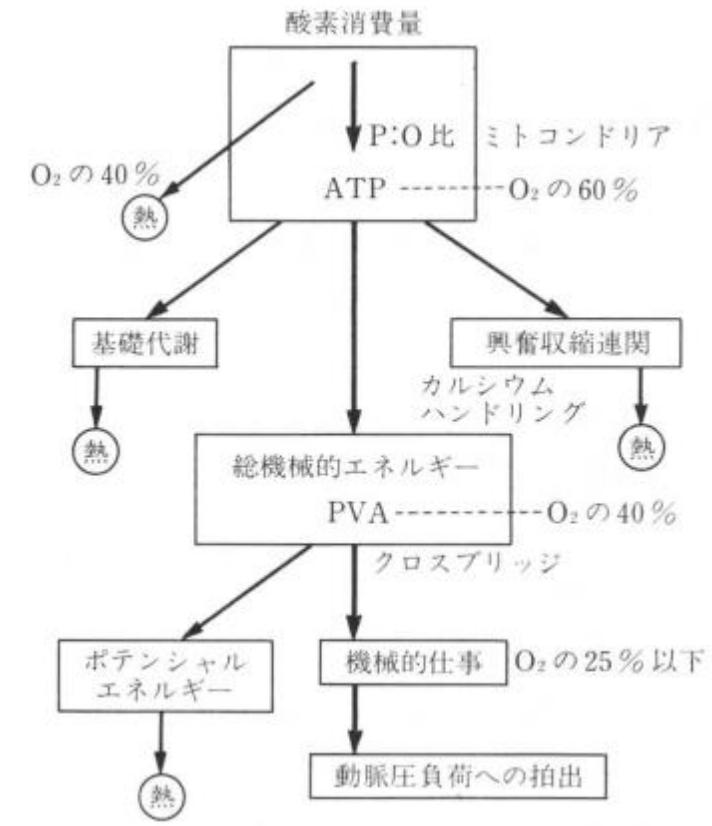
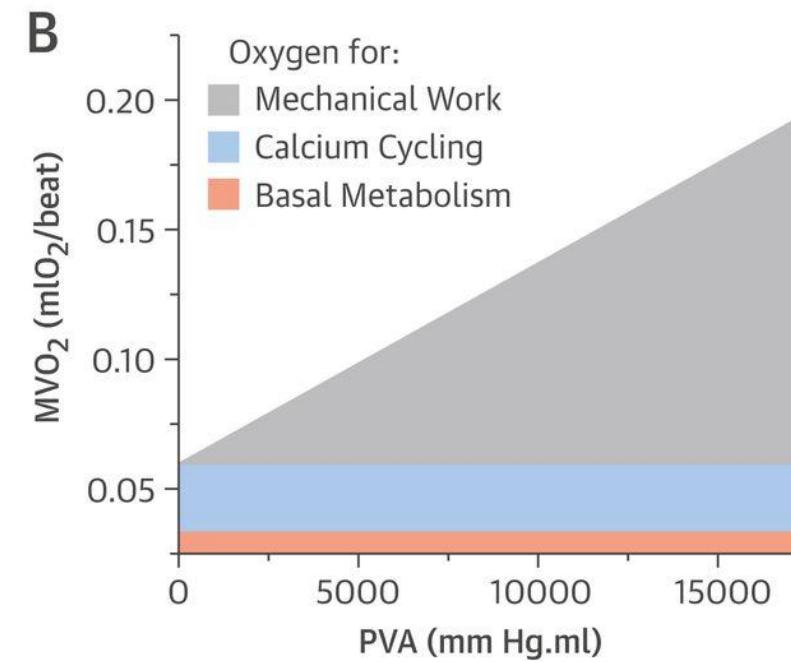
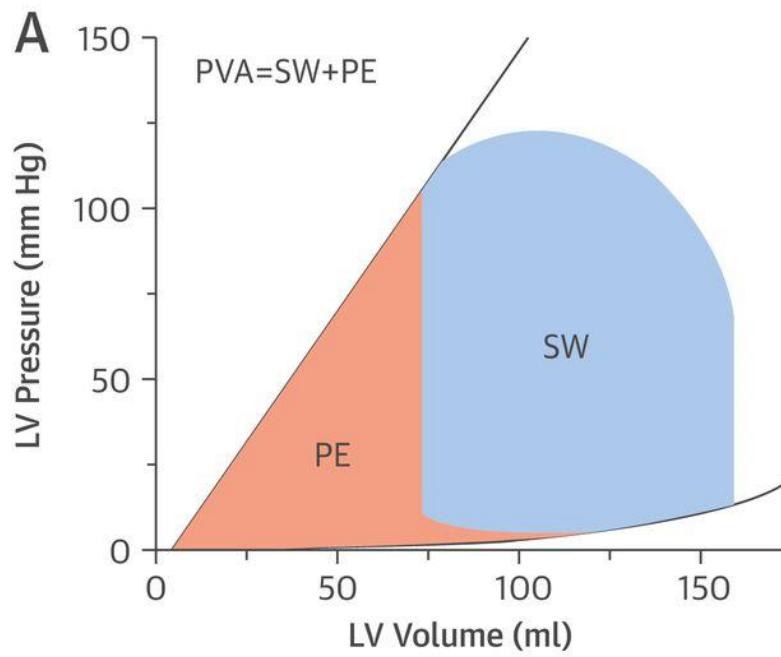


Power (W):
 $(CO \times MAP)/451$
=CPO

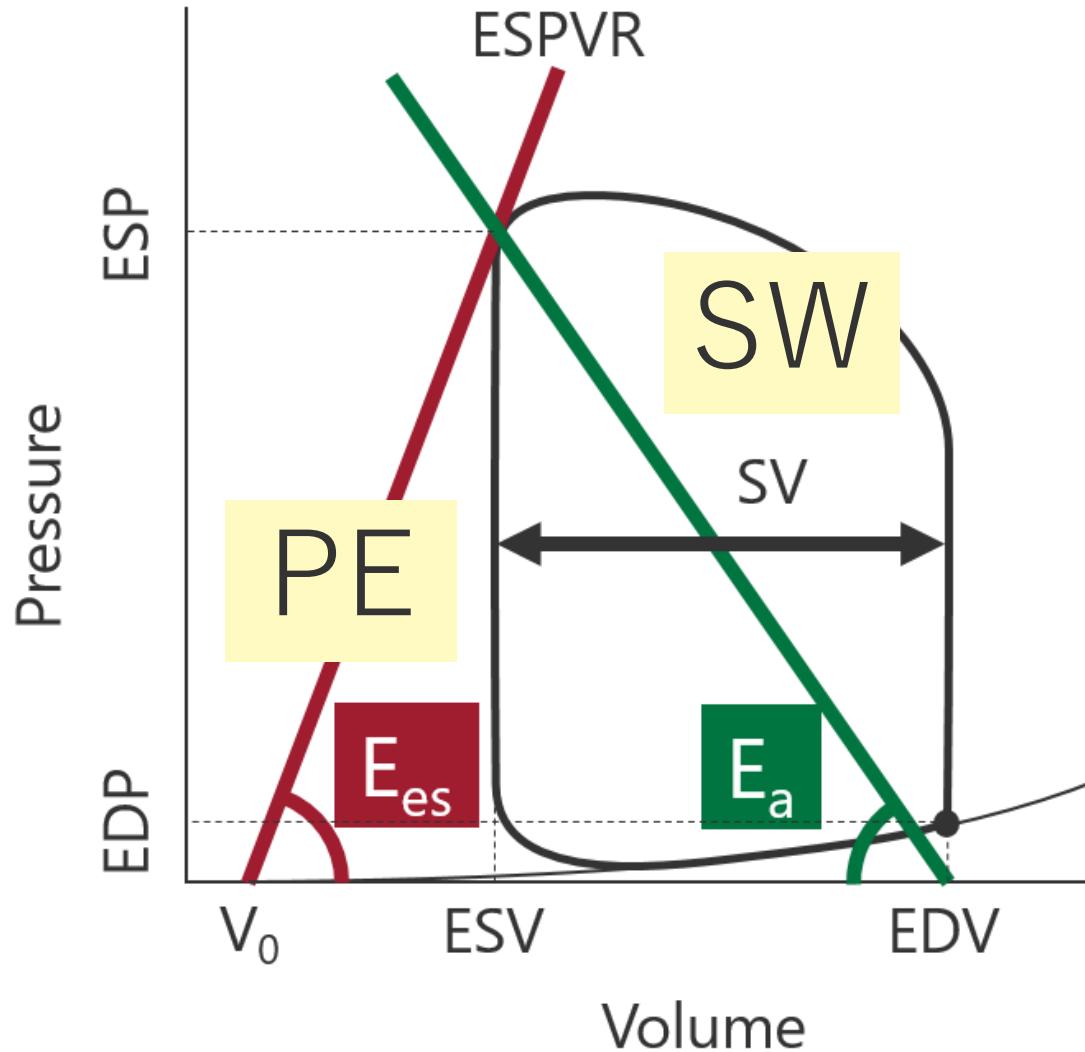
Right CO determines the VR of left heart

いかに効率よく末梢が要求する心拍出を生み出して出しているのか？

PVAと酸素消費は線形関係



PVAの決まりかた



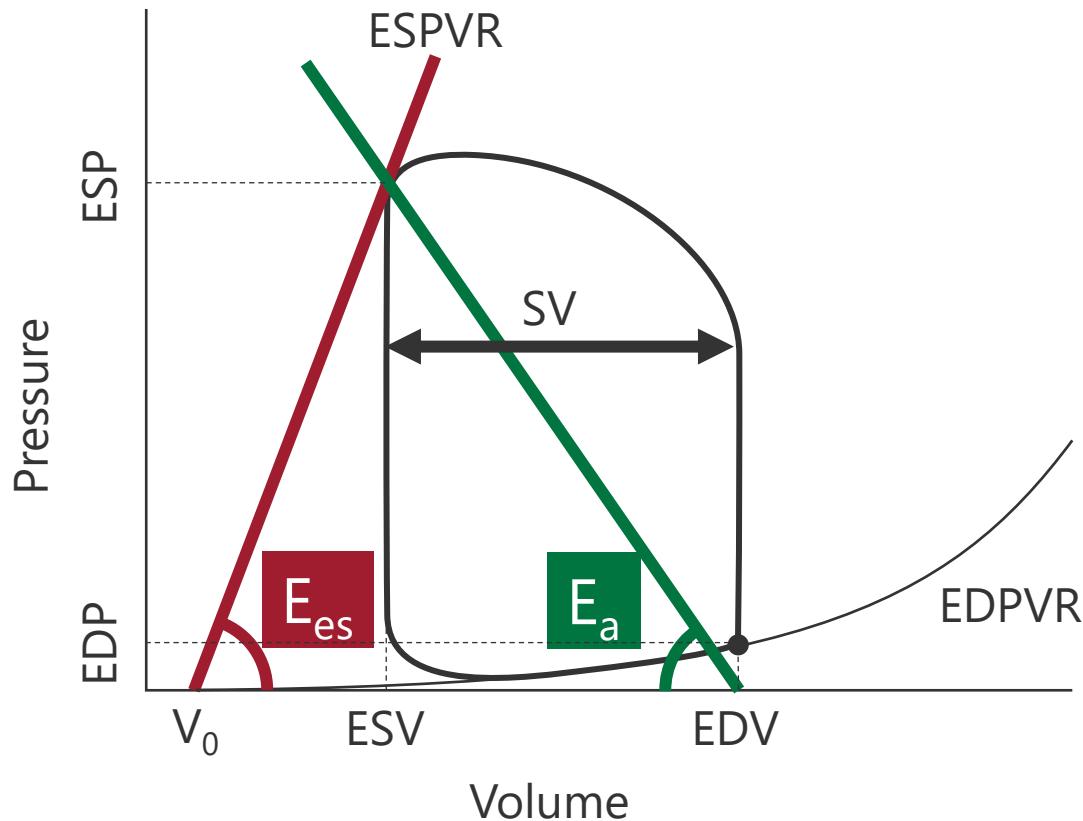
PVAは主には,,,

- E_{es} と E_a の傾き
- 前負荷

PVA内のSW（外的仕事）は

- E_{es} と E_a の傾き比率

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

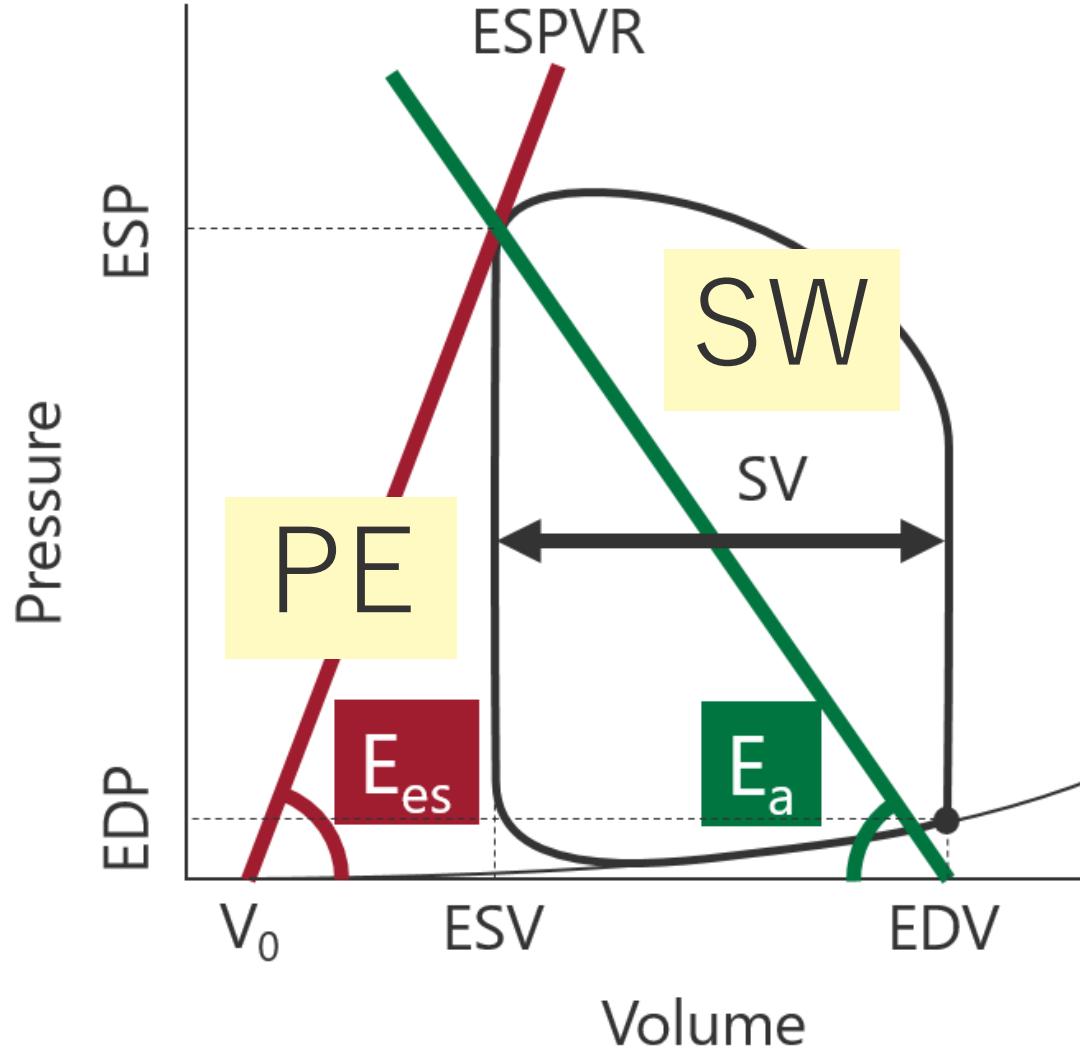
$$\left\{ \begin{array}{l} E_{es} = \frac{ESP}{ESV - V_0} \\ E_a = \frac{ESP}{SV} \\ SV = EDV - ESV \end{array} \right.$$

▼

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

実効的な駆出率 (EF)

PVAの決まりかた



PVAは主には,,,

- E_{es} と E_a の傾き
- 前負荷

PVA内のSW（外的仕事）は

- E_{es} と E_a の傾き比率
→ EFがいかに重要な指標かわ
かります！

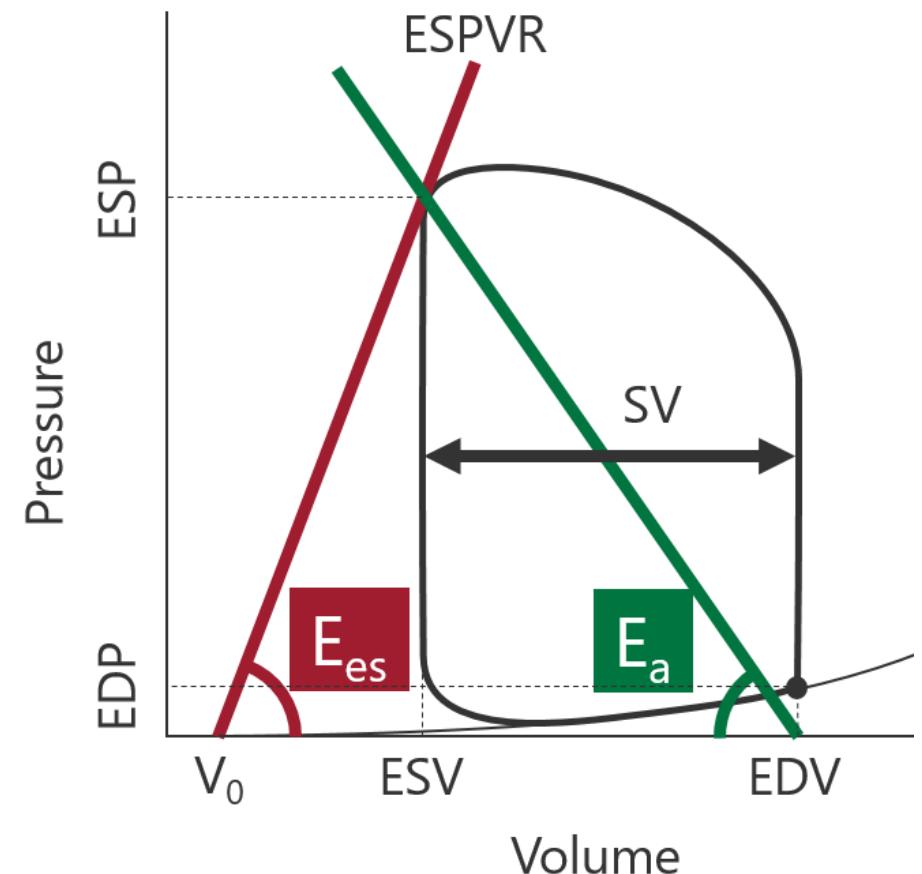
効率？

少ないエネルギーで外的な仕事 (Stroke work: SW) がもっと多くなるようにした方がよいはず？

効率にもいろいろ定義がある

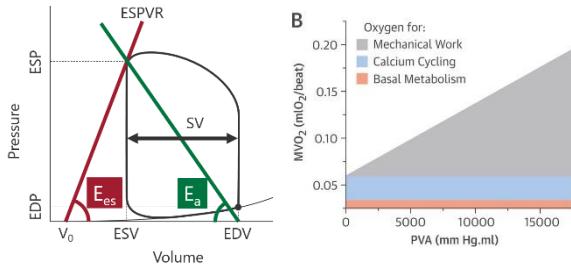
PVAのなかのSW (外的仕事)

酸素消費中のSW

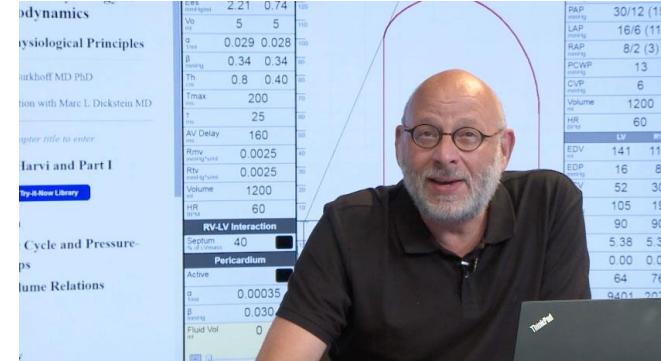


至適条件：SWの変化とSW/酸素消費 (MVO_2)

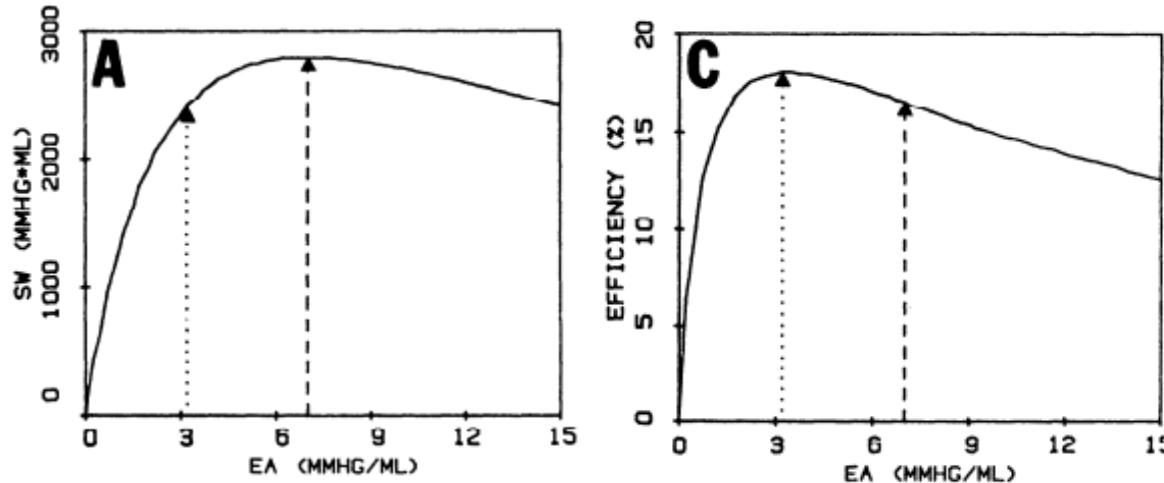
Ventricular efficiency predicted by an analytical model



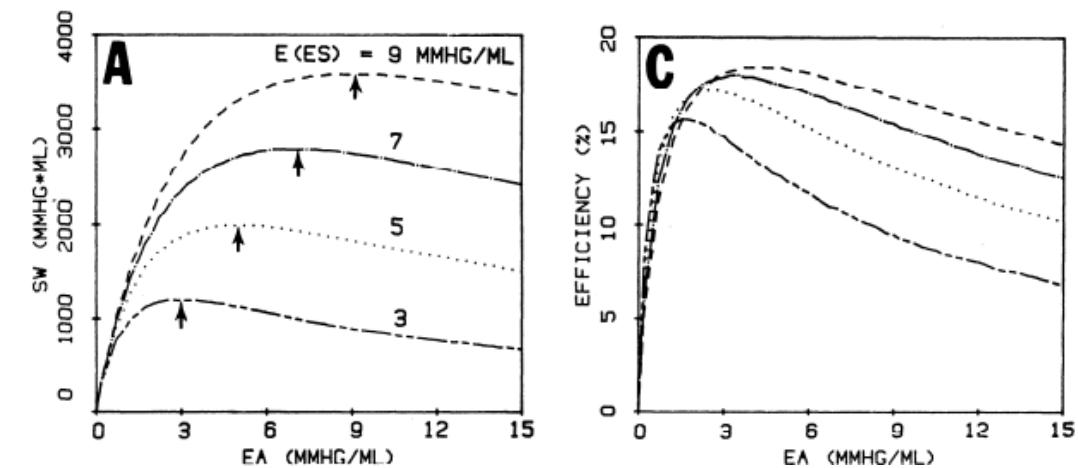
→ PVA, SW, MVO_2 を数式で表して効率を検証



Eesを7に固定したとき

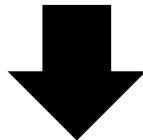


Eesをさまざまに変えたとき



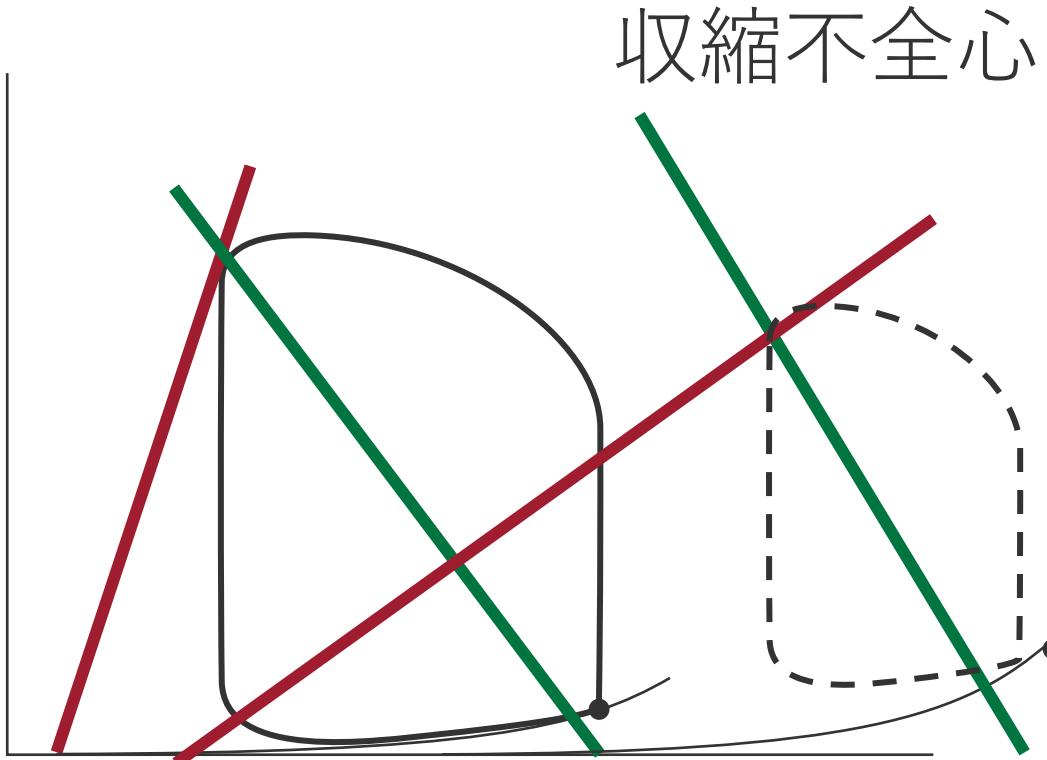
至適条件：SW/PVAとSW/酸素消費 (MVO_2)

- 酸素消費に対するSWの割合は $E_{es}:E_a$ が 2:1 くらいのときに
もっとも最大化される。
→ 実際の EF は 60-70% であり、至適効率を保っている！



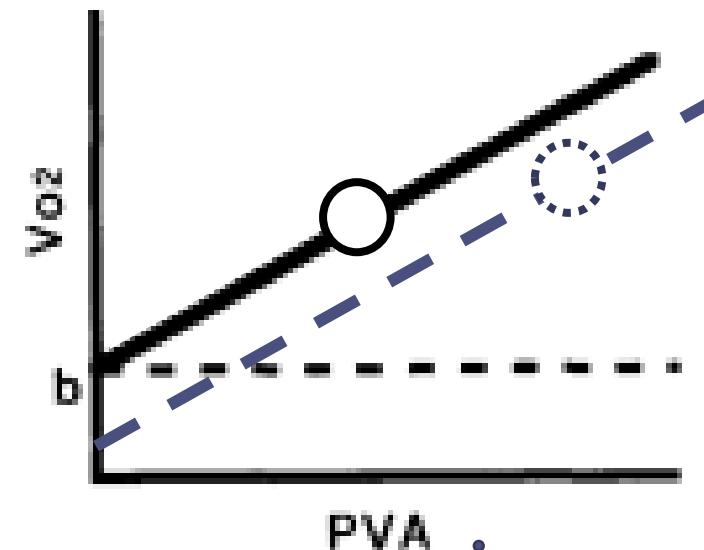
- この効率は、運動や交感神経刺激、多少の体液量変化では保たれる！

心不全では？



EF↓ + 容量↑の心不全が以下に非効率か
が理解できる

- 酸素消費は心不全の方が高いことが知られている (1.2~1.5倍くらい)
- 心不全では E_{es}/E_a のカップリングが明らかに至適でない！
- PEの割合が多くなる



まとめ

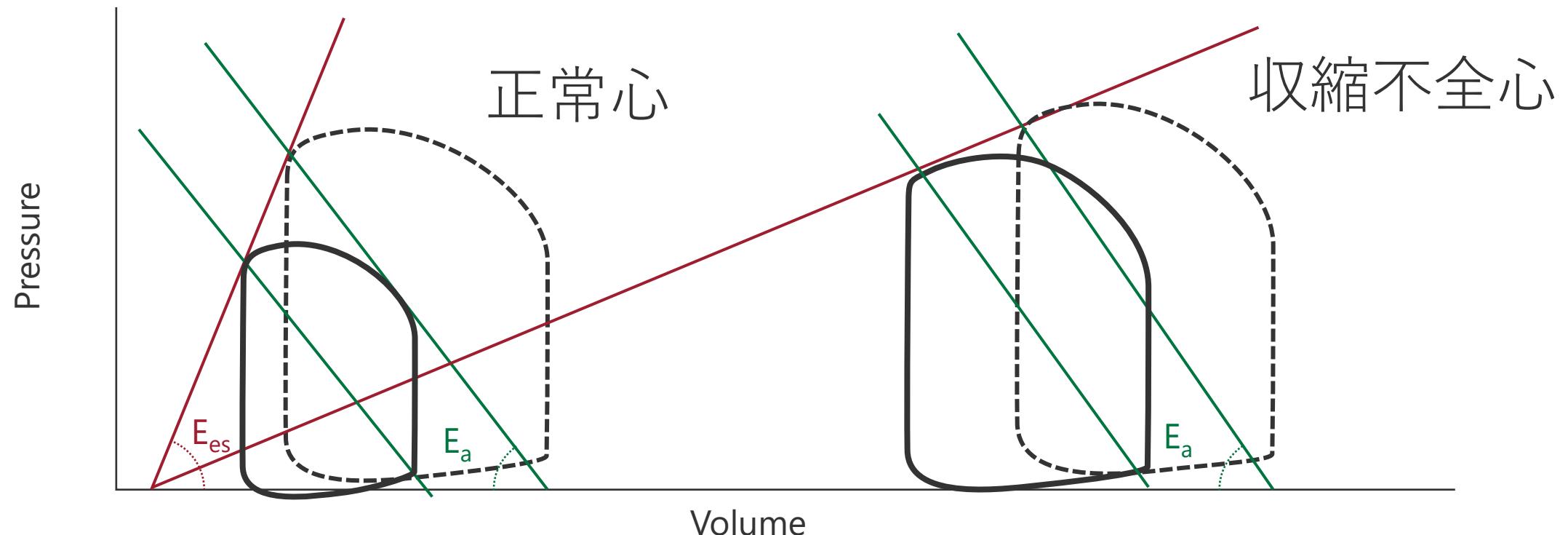
- PV loopには心臓の酸素消費が現れる。
- 生体では、酸素消費に対しての外的仕事が最大化されている
- LVEFが60%あたりが正常値なのには理由がある
→ $E_{es}:E_a = 2:1$ くらいを保つと効率がよいから
- 生体では運動やさまざまな負荷の変化に対して心室の仕事効率が至適になるように調節されている

良い心臓の1回心拍出は前負荷依存

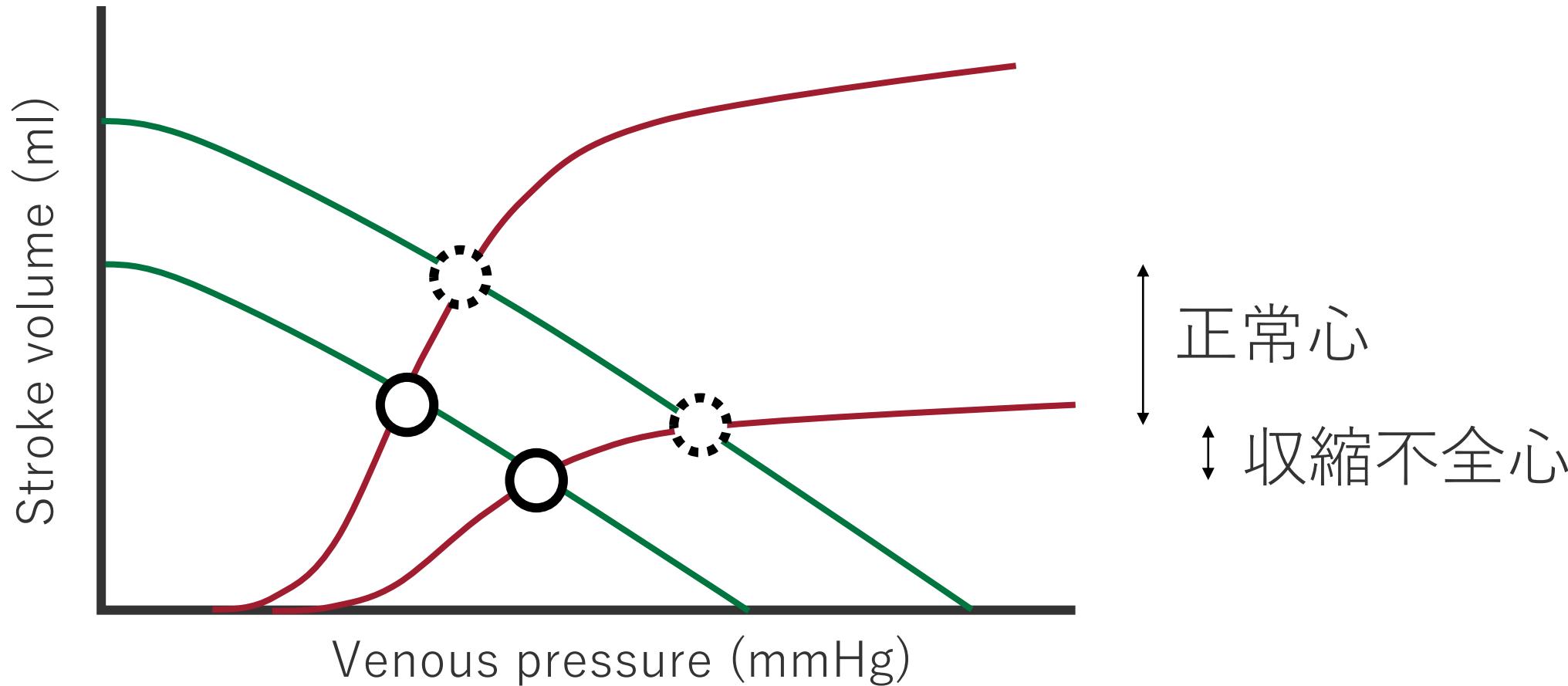
$$SV = \frac{E_{es}}{E_{es} + E_a} (EDV - V_0) \rightarrow E_{es} \text{が大きければ、前負荷でしっかりSVが変化する}$$

E_{es} が小さければ、前負荷でSVが変化しない

正常心ではSVが前負荷で大きく変わる



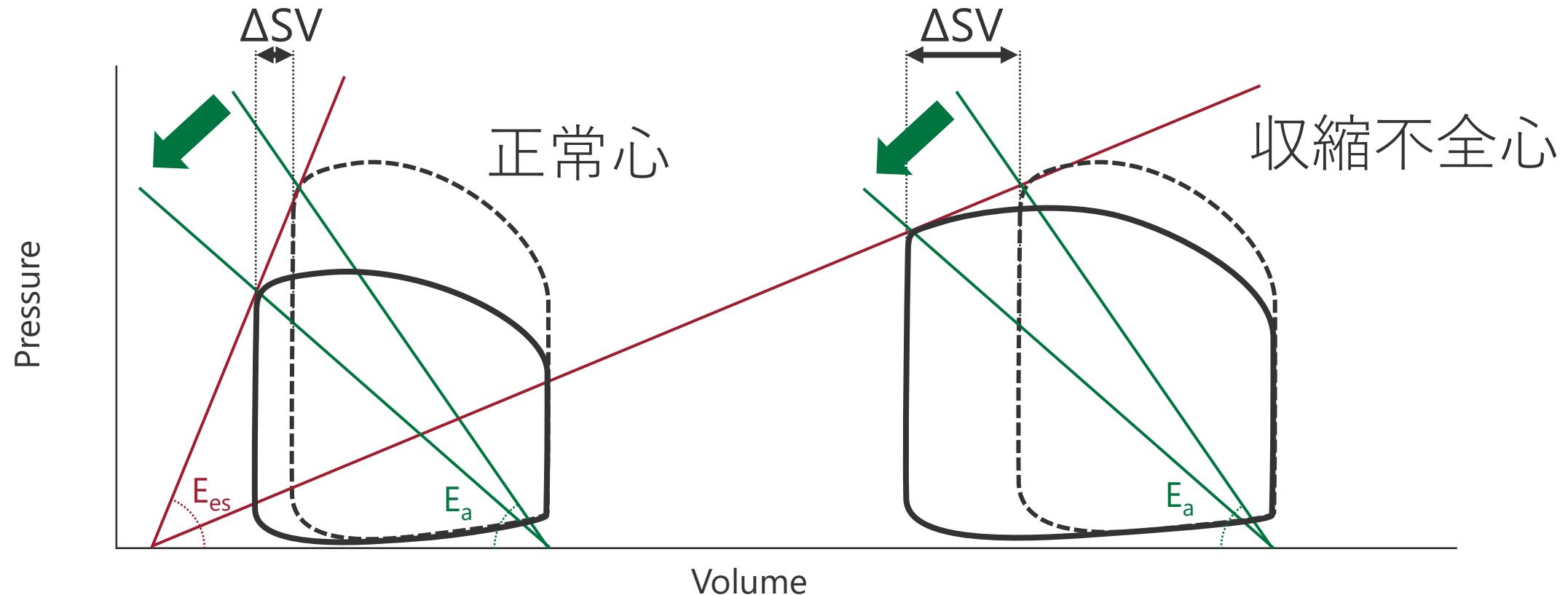
良い心臓の1回心拍出は前負荷依存



悪い心臓の1回心拍出は後負荷依存

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

E_{es} が大きければ、 E_a の影響少ない
 E_{es} が小さければ、 E_a の影響大きい



$E_{es}=E_a$ のバランス、 EF_e の理解は相当重要！

- 心不全に血管拡張薬
→ E_a を下げることでSV増加
- Afterload mismatch?
→ E_a の急上昇による心不全と捉えるとある程度の E_{es} 低下がある状況で起こると考える方が自然
- 心臓リモデリング
→ 血管拡張薬、徐伯薬：機械効率改善と酸素消費抑制
→ β 遮断薬：非機械的エネルギー抑制を介した酸素消費抑制

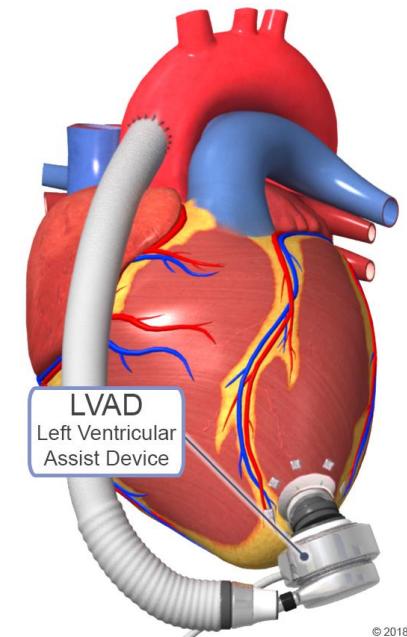
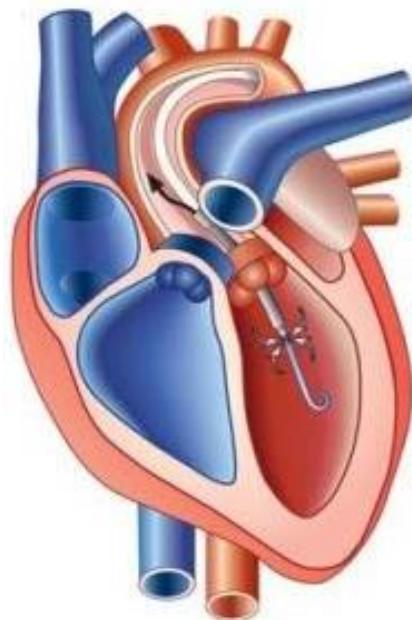
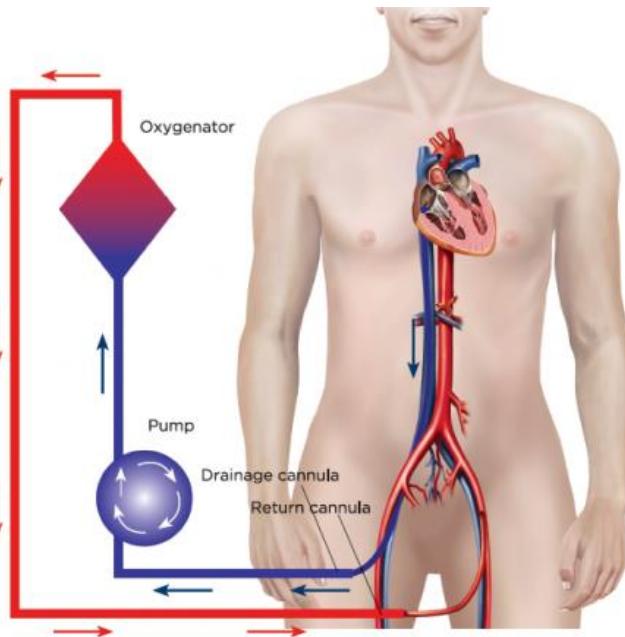
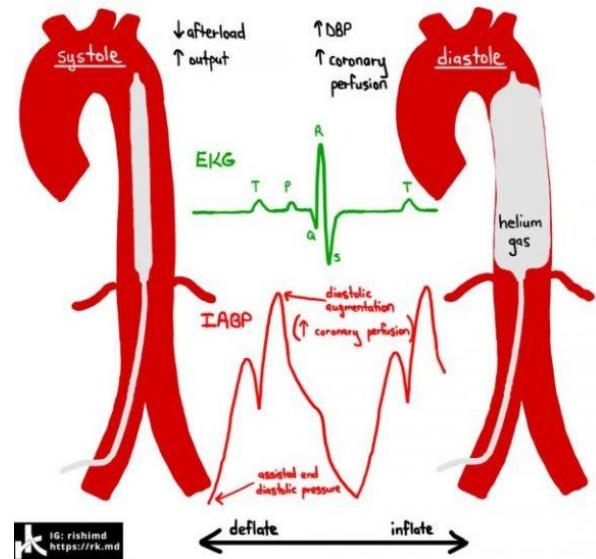
心不全の改善=心臓エナジエティクス是正



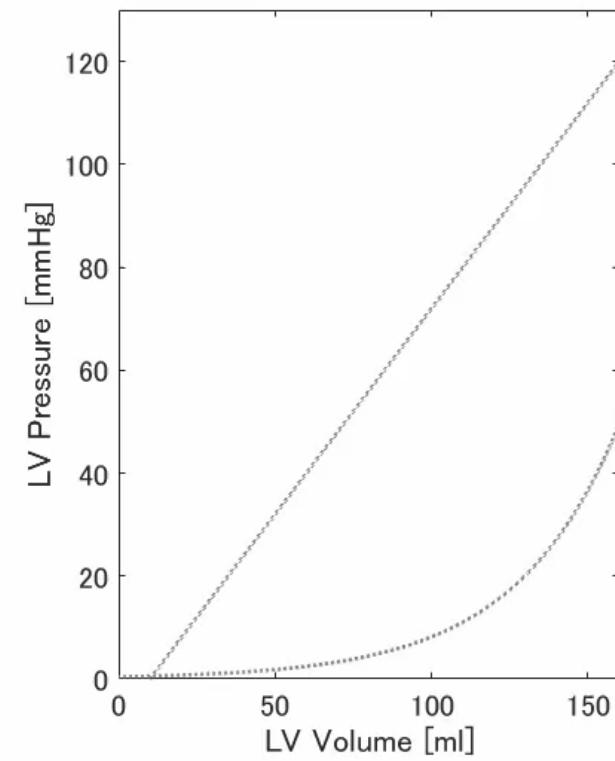
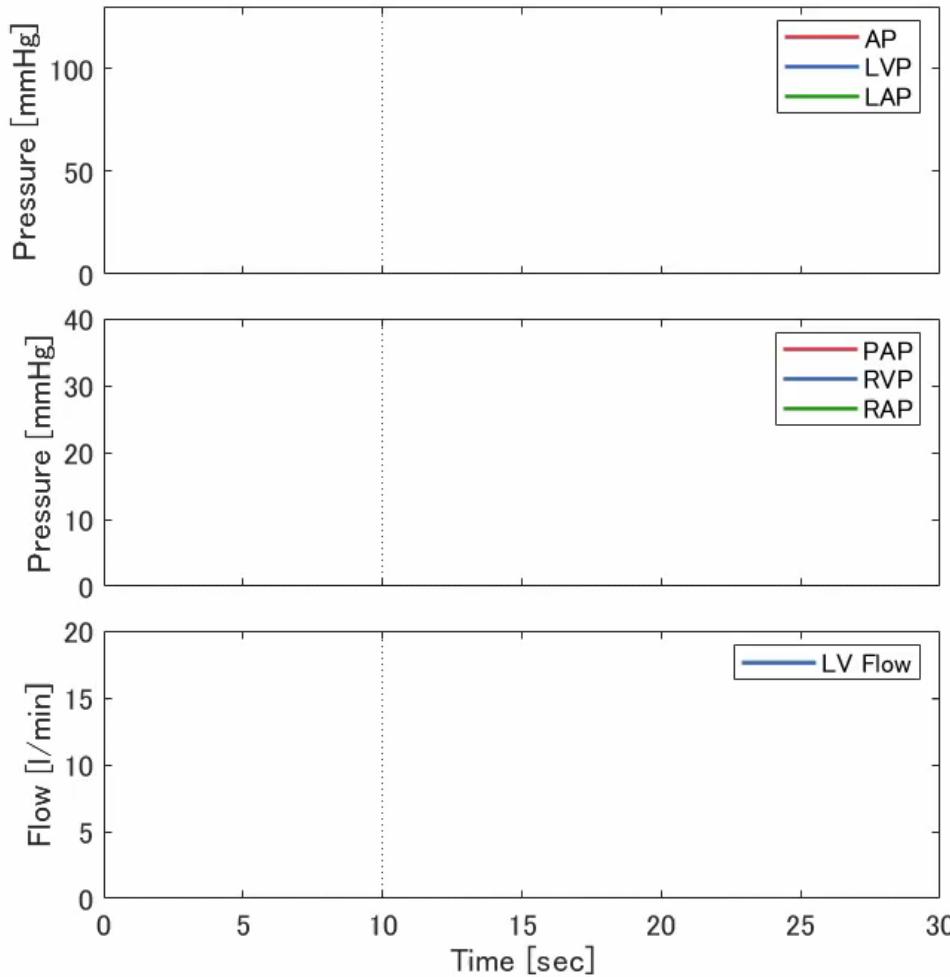
$E_{es}=E_a$ のバランス、 EF_e の理解は相当重要！

- 心不全に血管拡張薬
→ E_a を下げることでSV増加
- Afterload mismatch?
→ E_a の急上昇による心不全と捉えるとある程度の E_{es} 低下がある状況で起こると考える方が自然
- 心臓リモデリング
→ 血管拡張薬、徐伯薬：機械効率改善と酸素消費抑制
→ β 遮断薬：非機械的エネルギー抑制を介した酸素消費抑制
- 体外循環

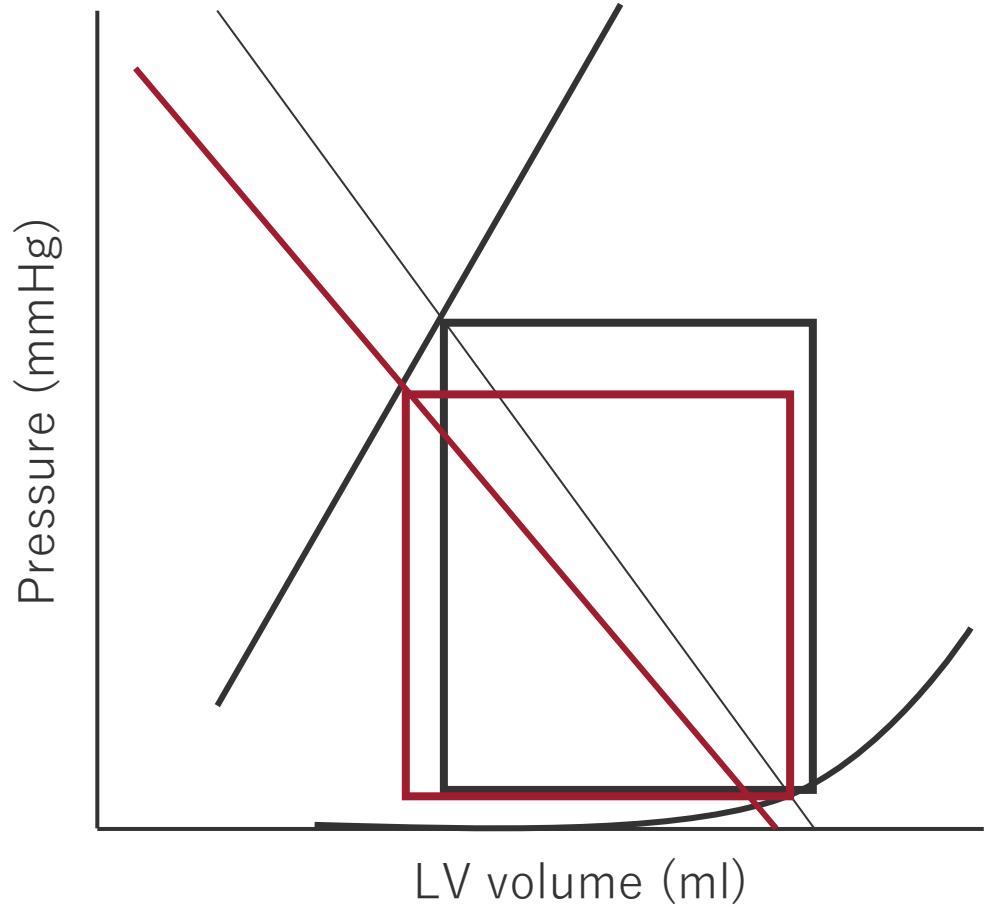
補助循環の理解→心臓エナジェティクス重要



IABP



IABPの後負荷低下機序



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×血管の硬さ

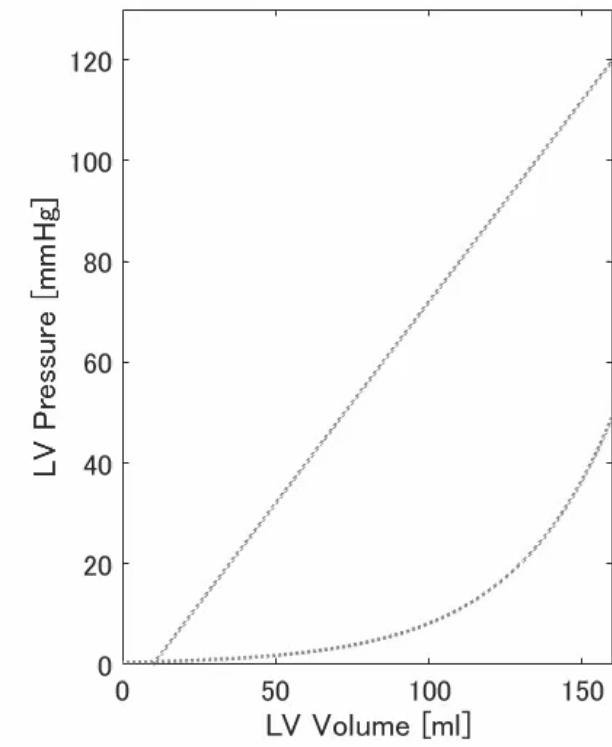
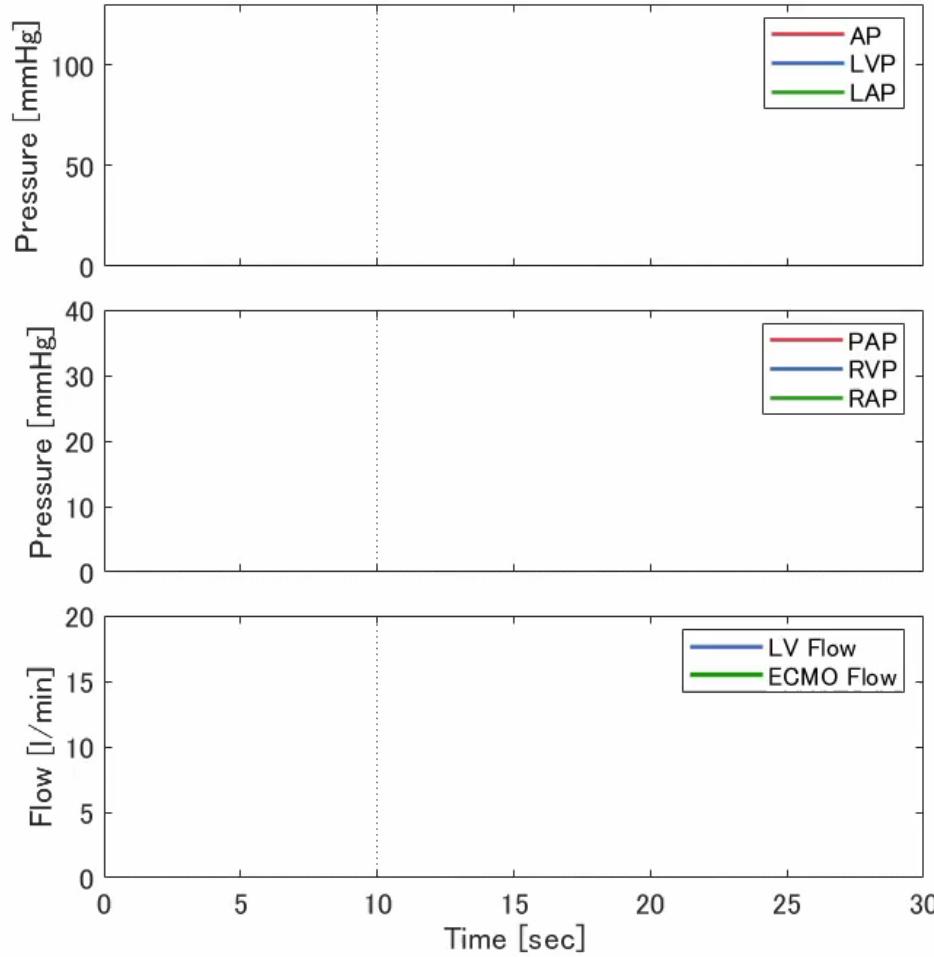
心室後負荷: Eaそのものの傾きは変わらないはずだが、バルーン分の血圧がさがるので、Eaのラインは下へさがる。



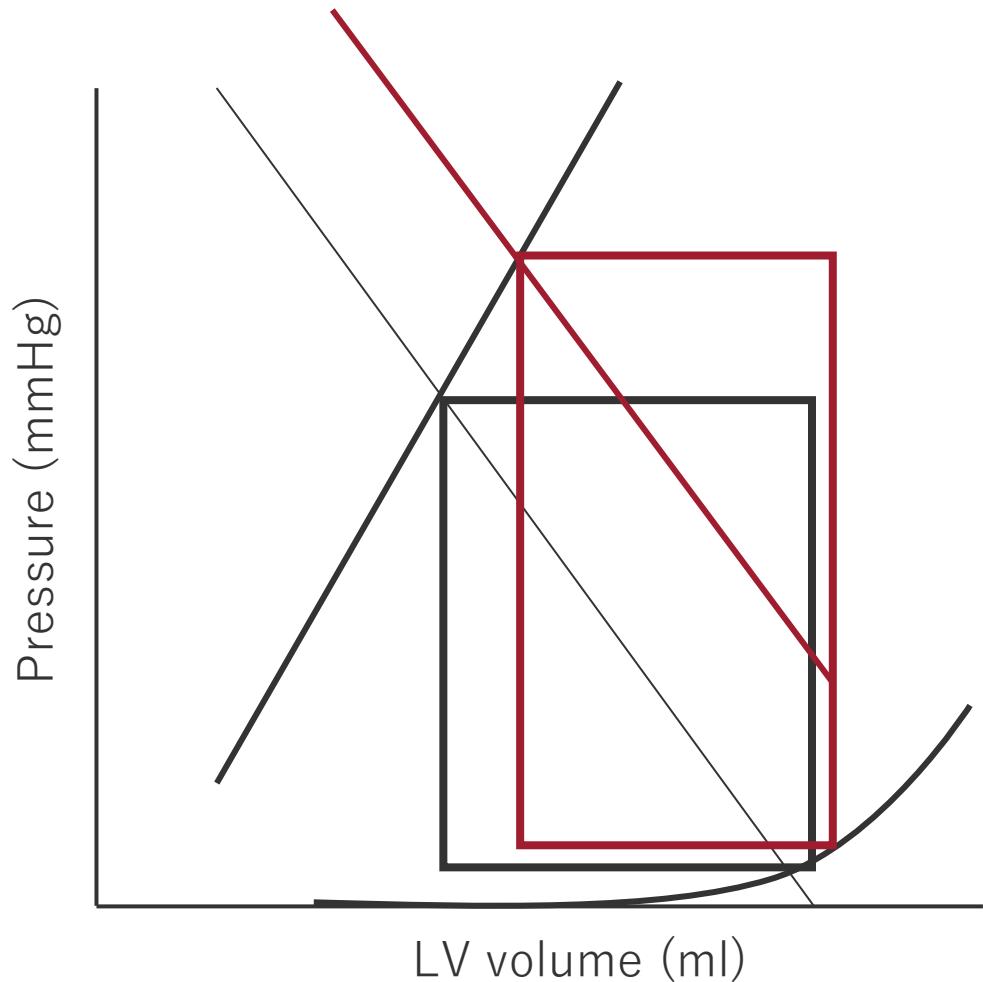
全体としてわずかに心拍出増加があり、EDVも低下し得る。

※冠血流増加により心収縮: Eesが増加したら、さらに心拍出増加

ECMO



ECMOの後負荷上昇機序



心臓には直接触らない！

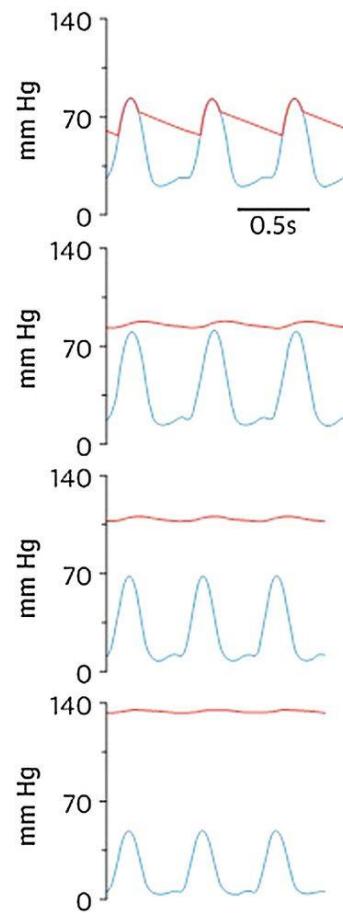
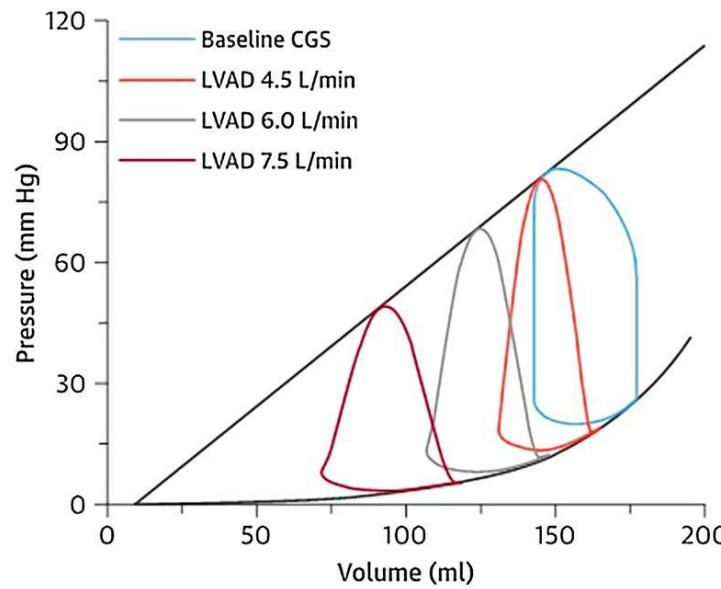
心臓に入ってくる血液を抜いて、その血液
を動脈へ送血
上がる血圧
 $= \text{ECMO Flow} \times \text{総血管抵抗}$



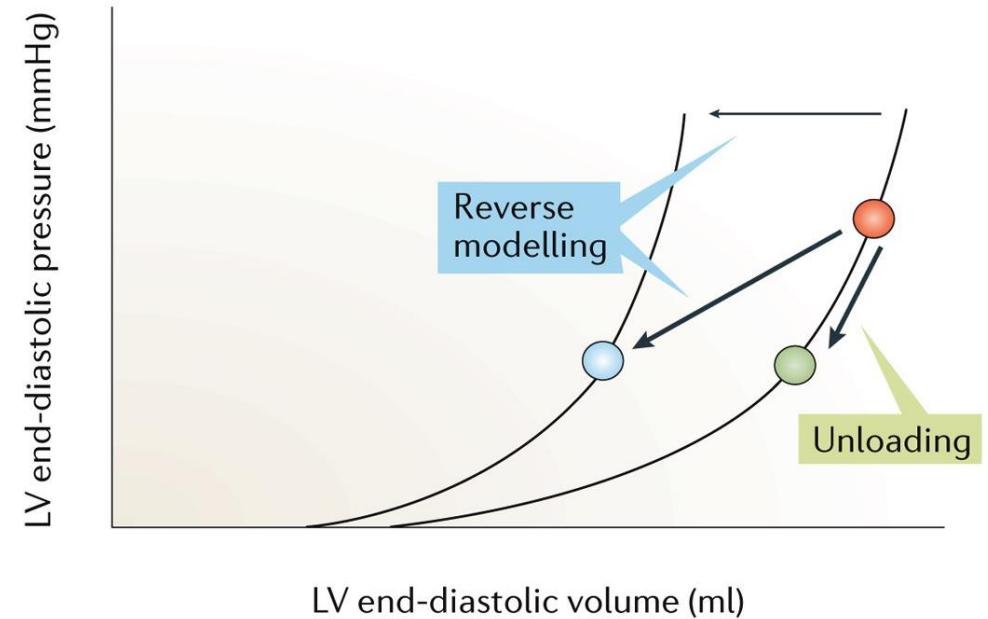
ECMO flow依存の後負荷上昇のために自己
心拍出は低下するが、ECMO flowが足され
るために血圧としては上昇する。

左室補助装置

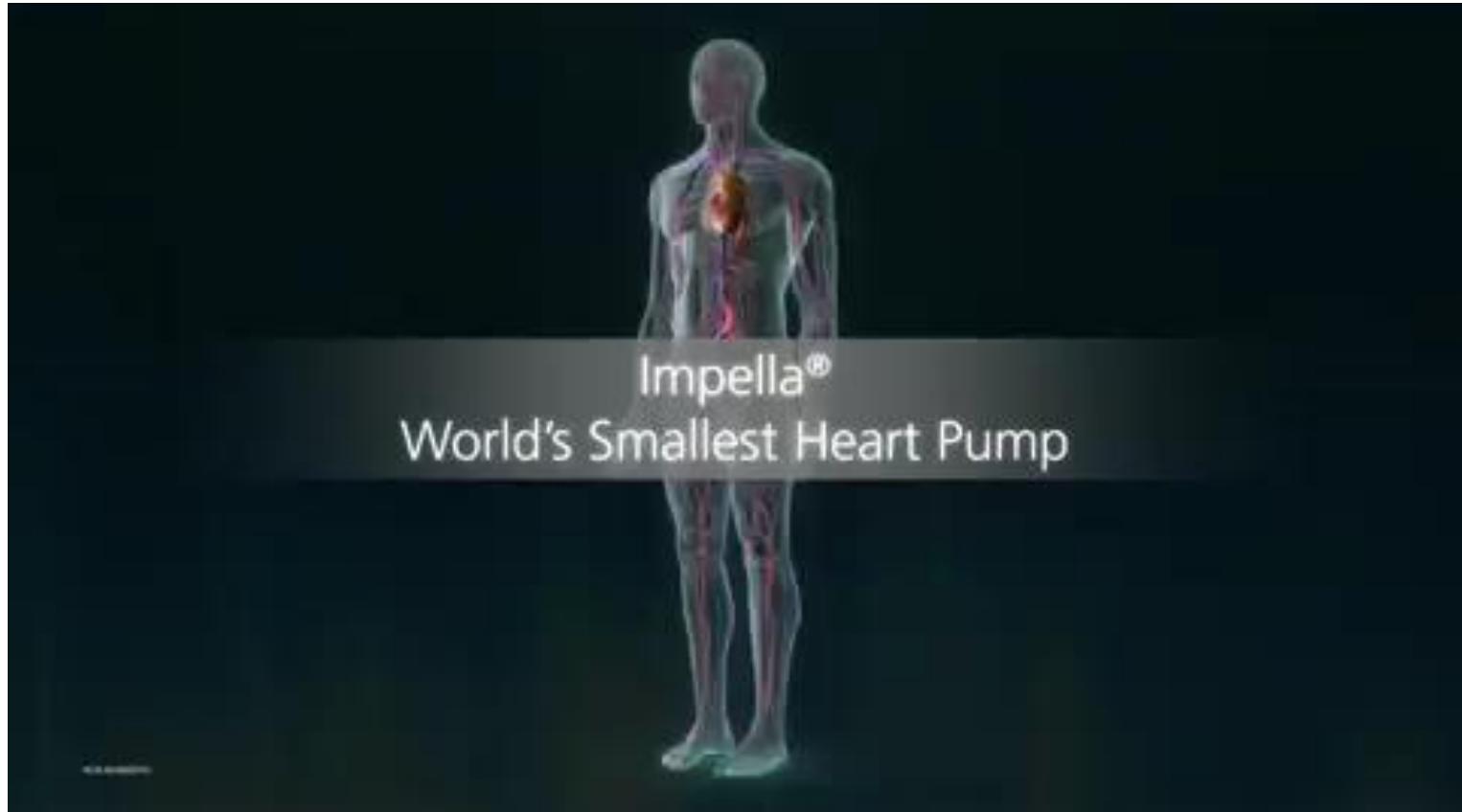
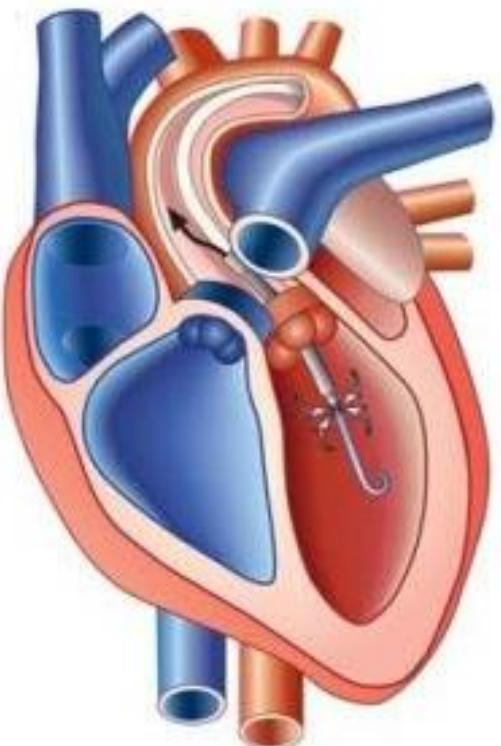
LVADはPVAを小さくする



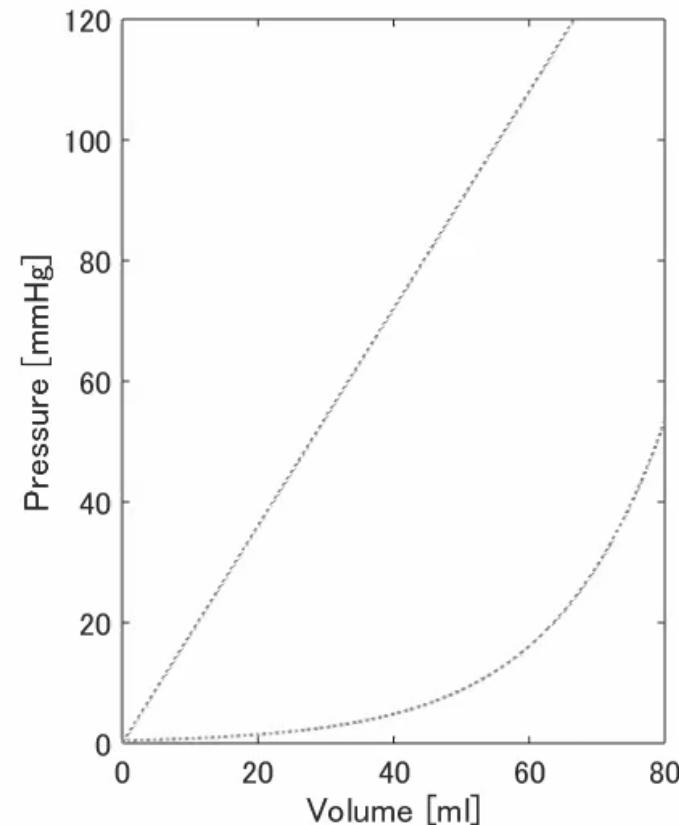
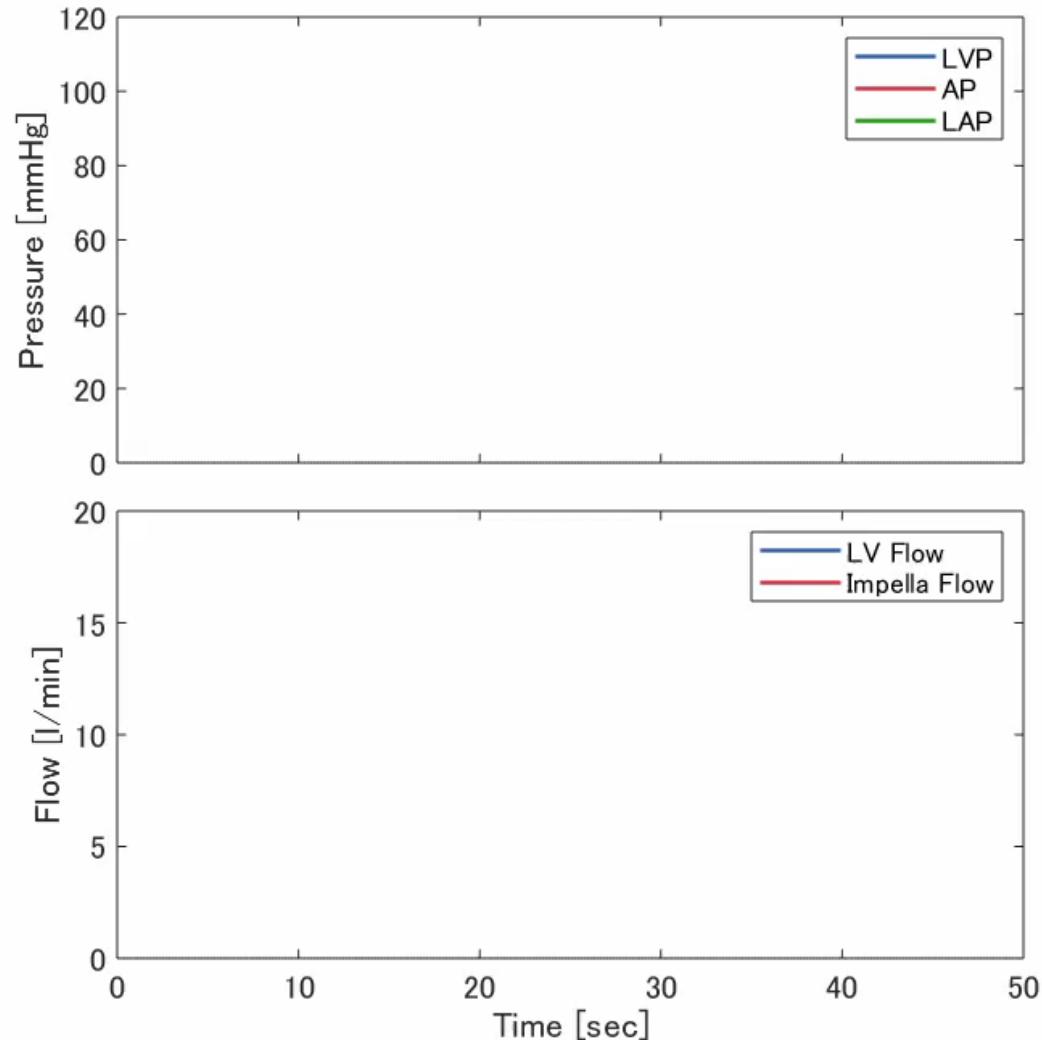
Reverse remodelingもする



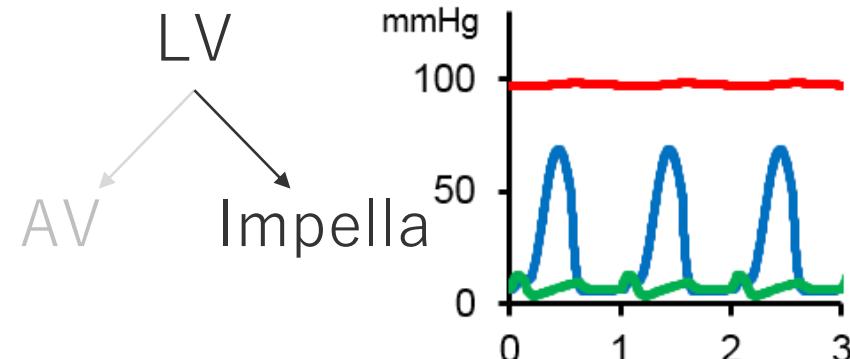
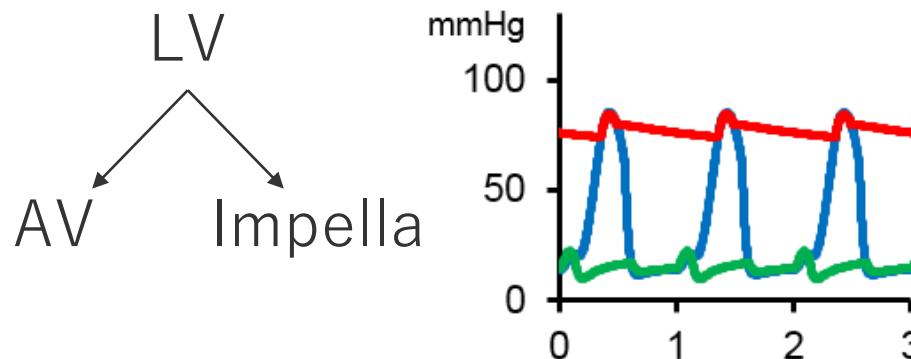
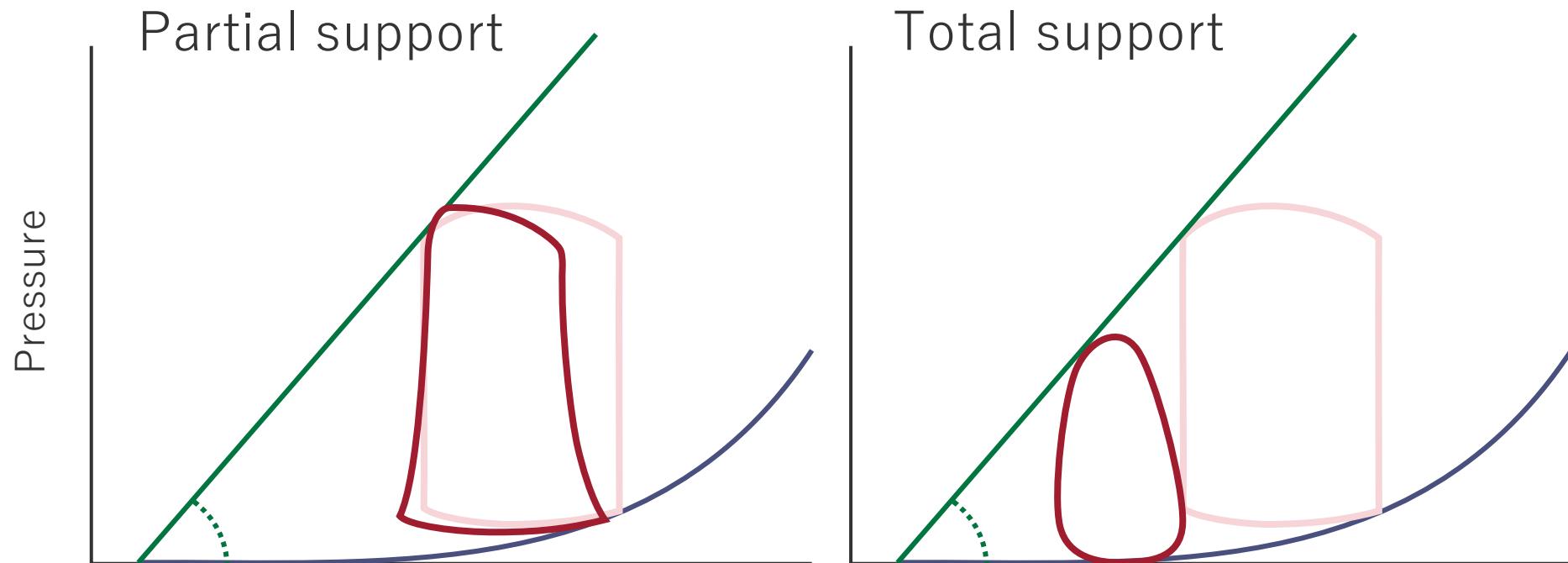
左室補助装置



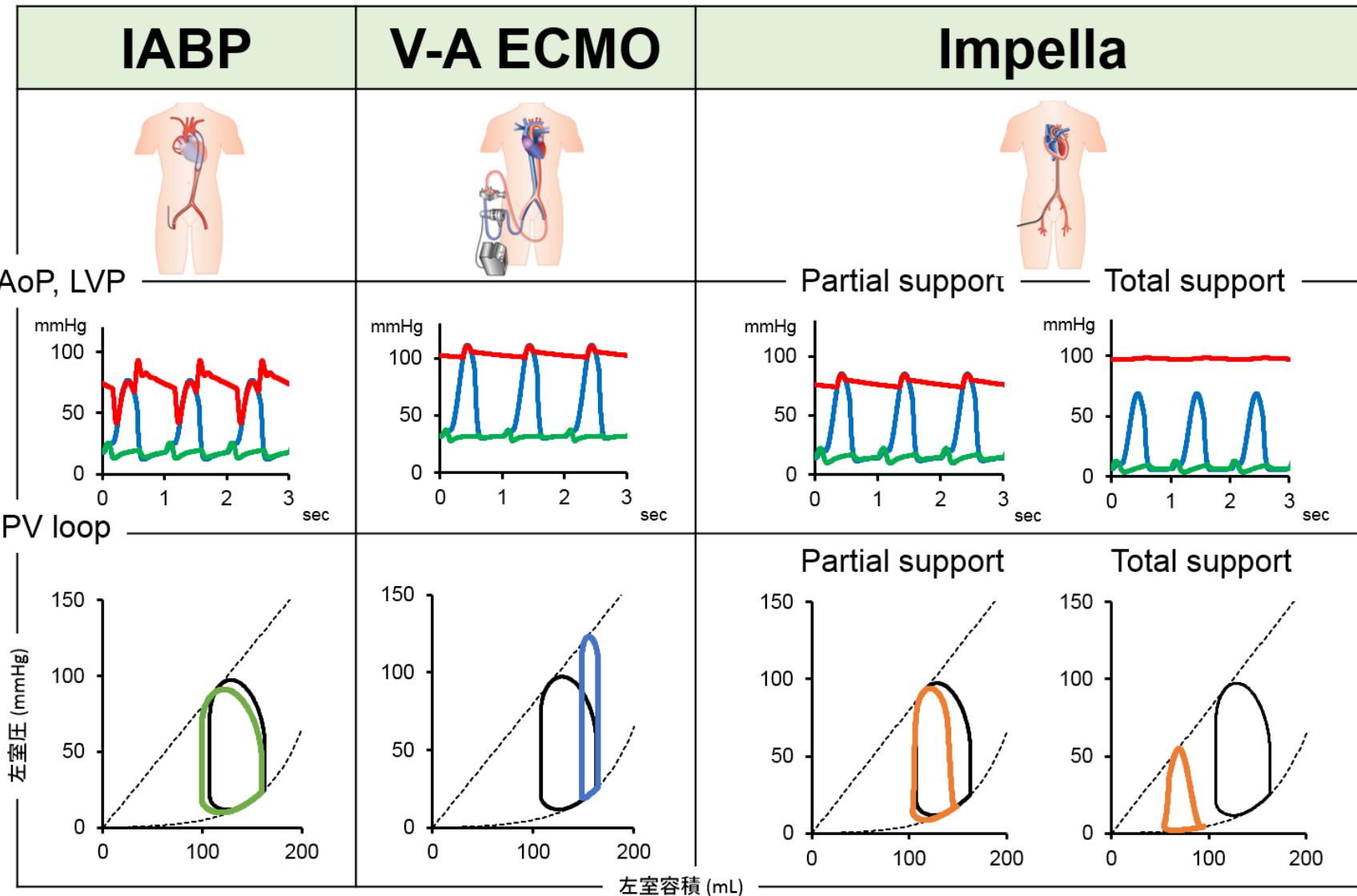
PV loopにどう影響する？



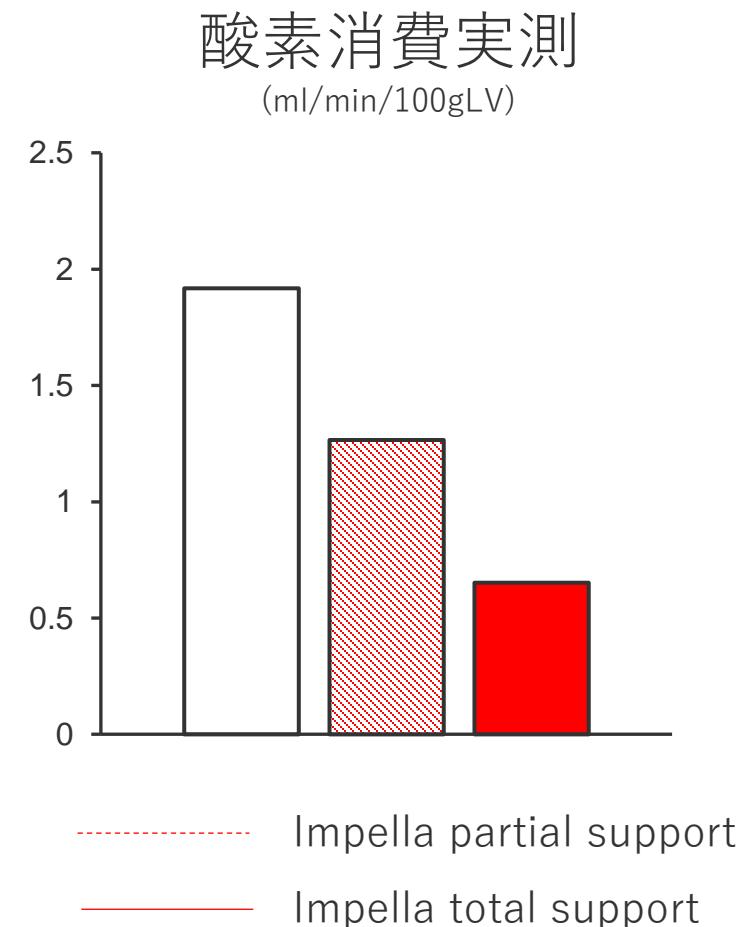
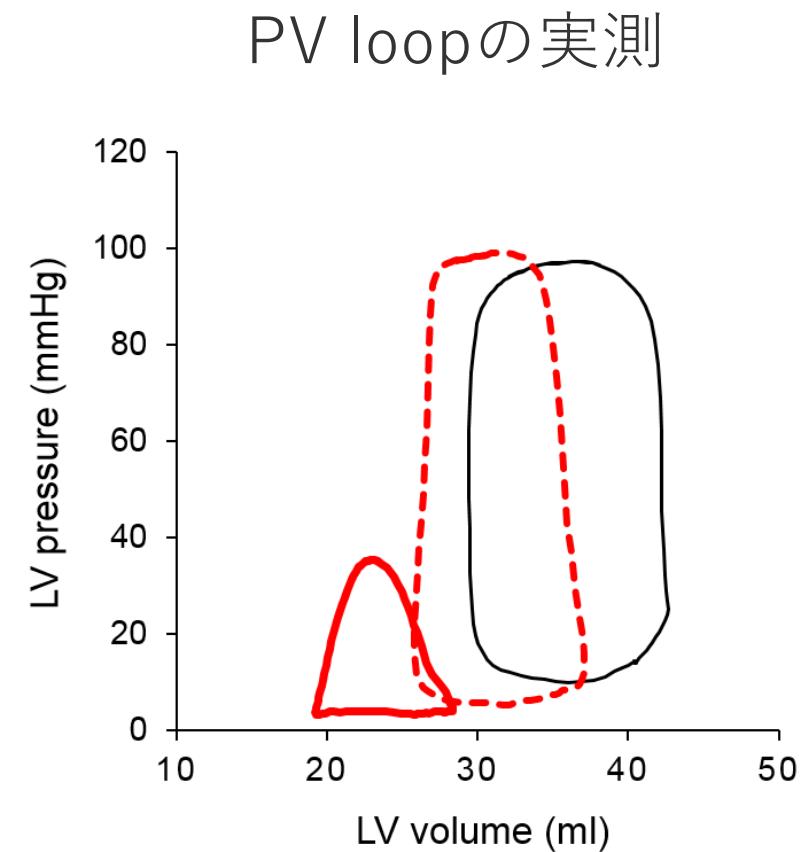
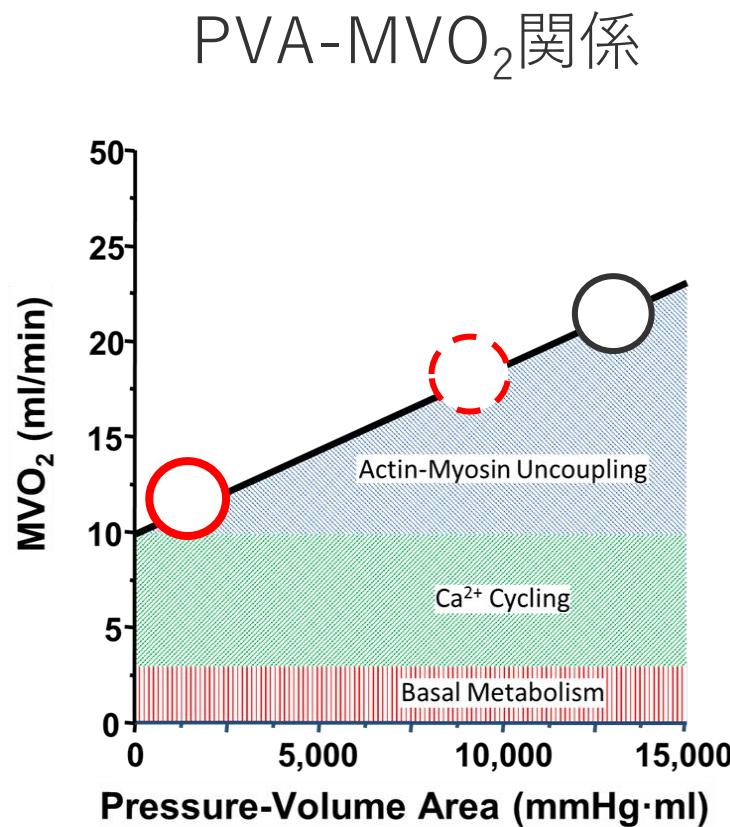
PV loopにどう影響する？



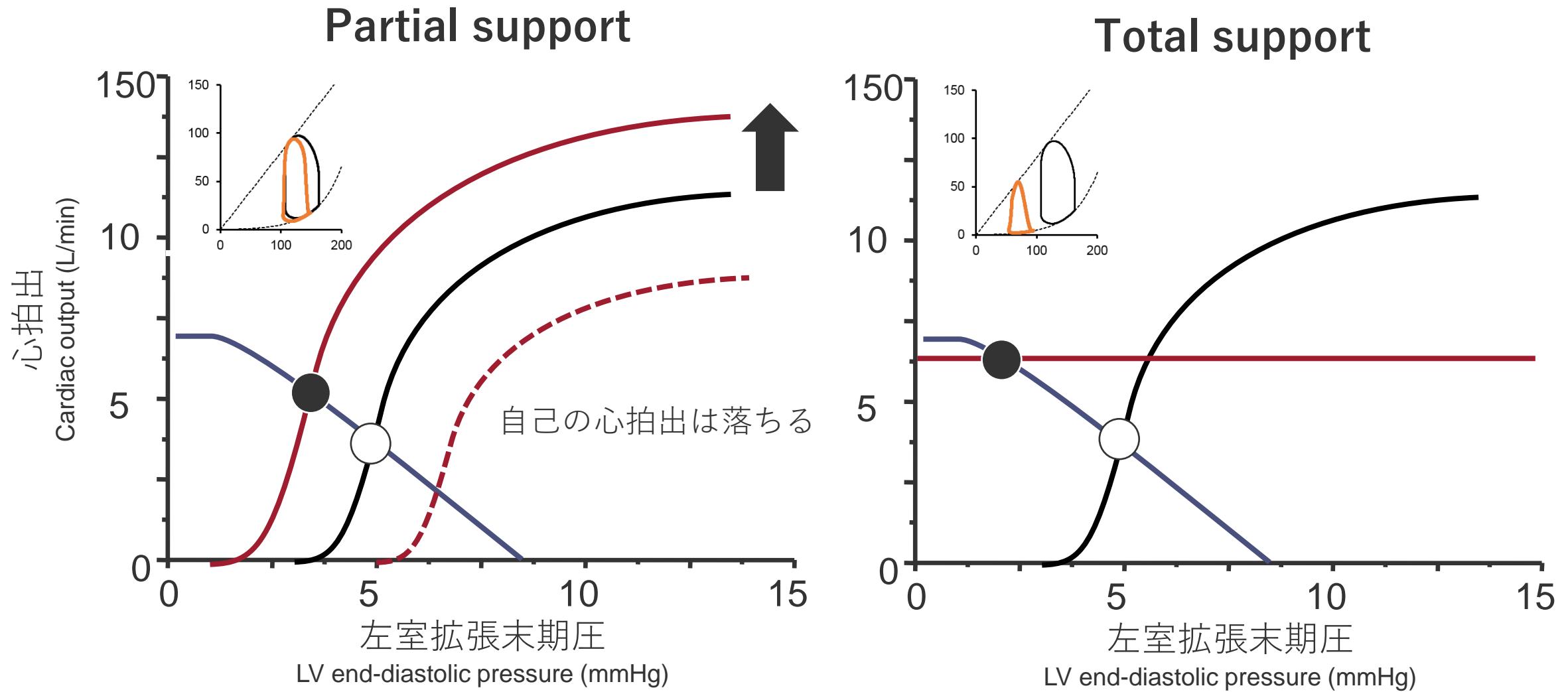
PV loopにこそ違いが出る



PVA減少 = 酸素消費減少



循環平衡でも理解しておく！



次のうち、自己心拍出（A弁からの拍出）が低下しない補助循環デバイスはどれでしょう？

1.IABP

2.PCPS (ECMO)

3.植込み型LVAD

4.Impella

次のうち、自己心拍出（A弁からの拍出）が低下しない補助循環デバイスはどれでしょう？

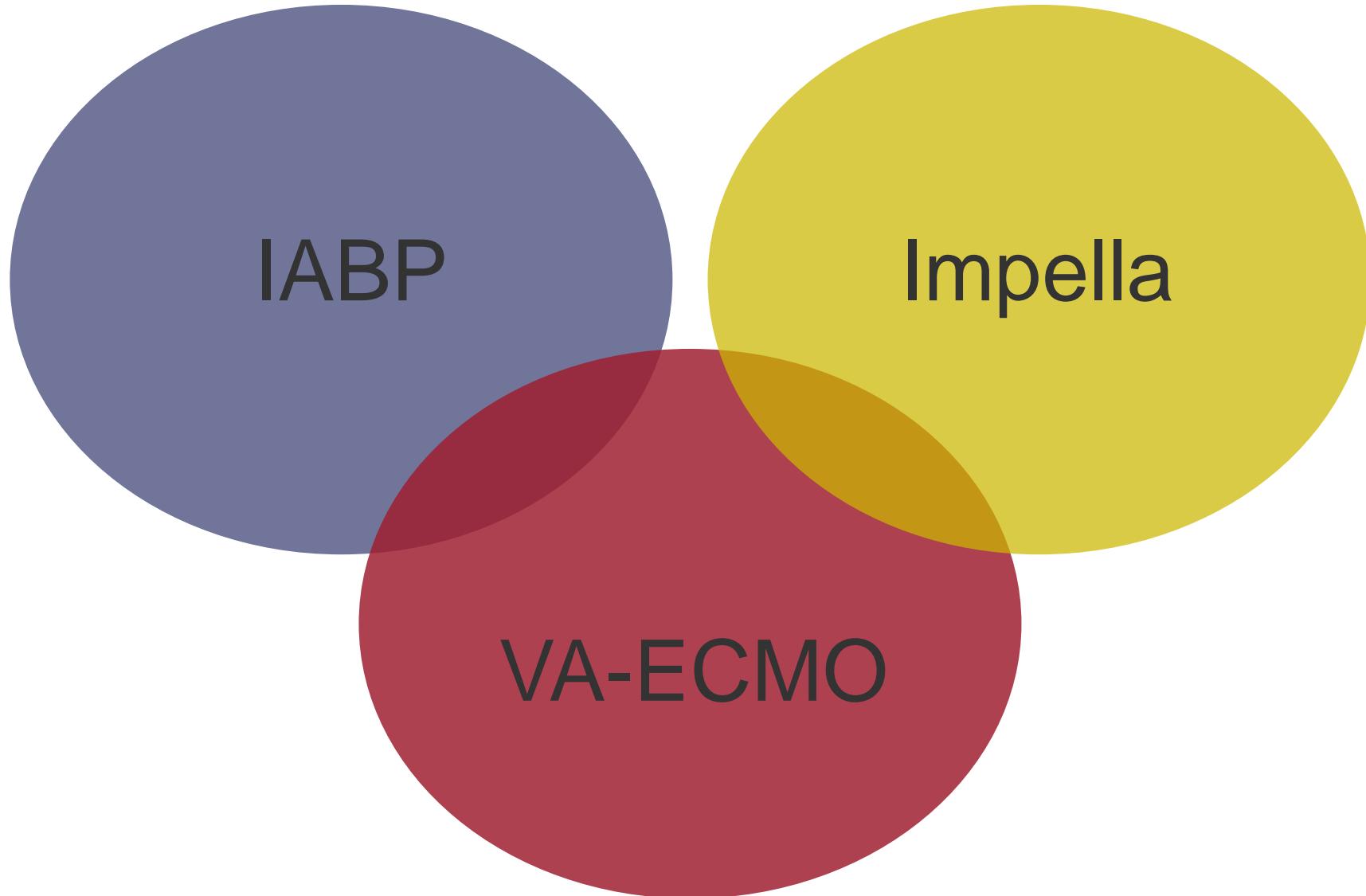
1.IABP

2.PCPS (ECMO)

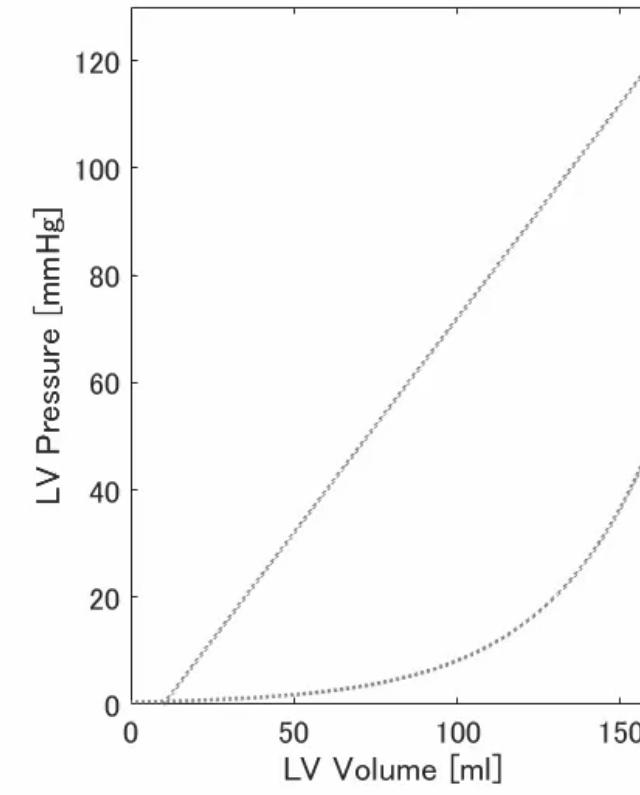
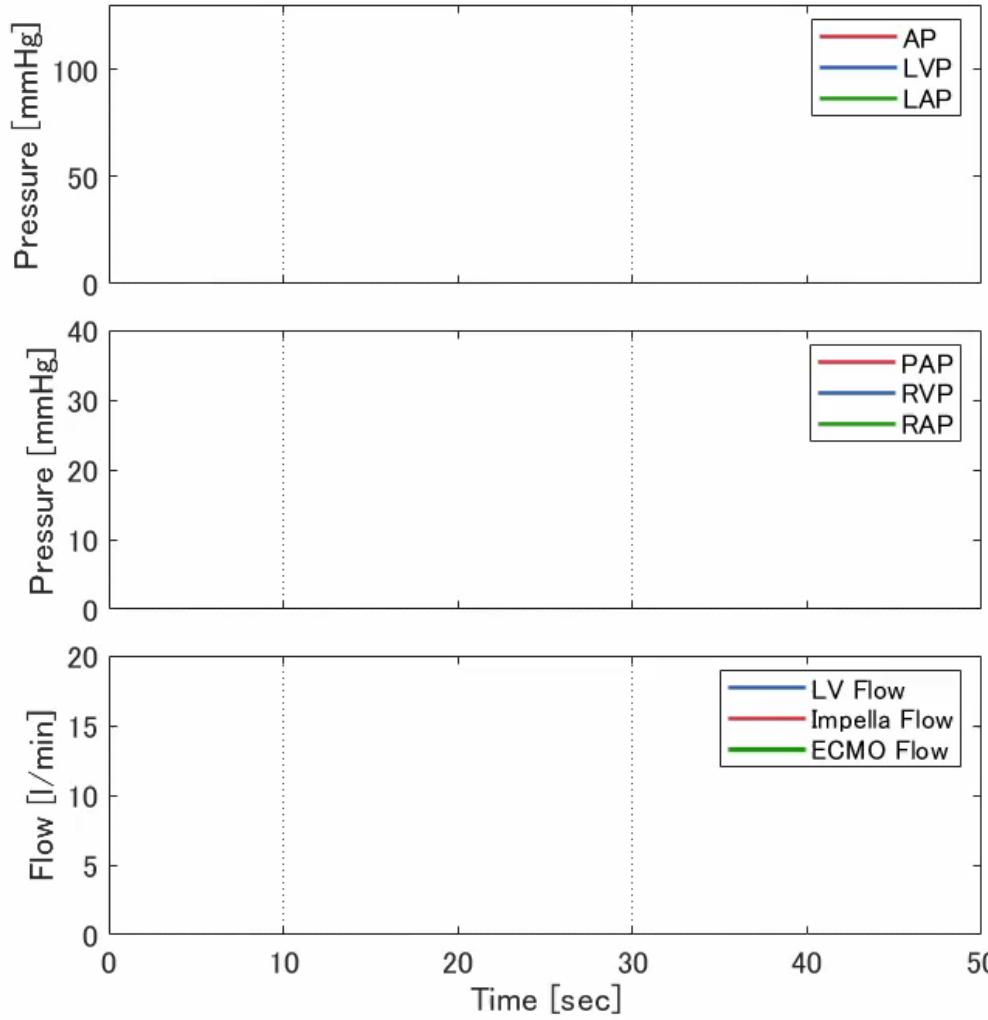
3.植込み型LVAD

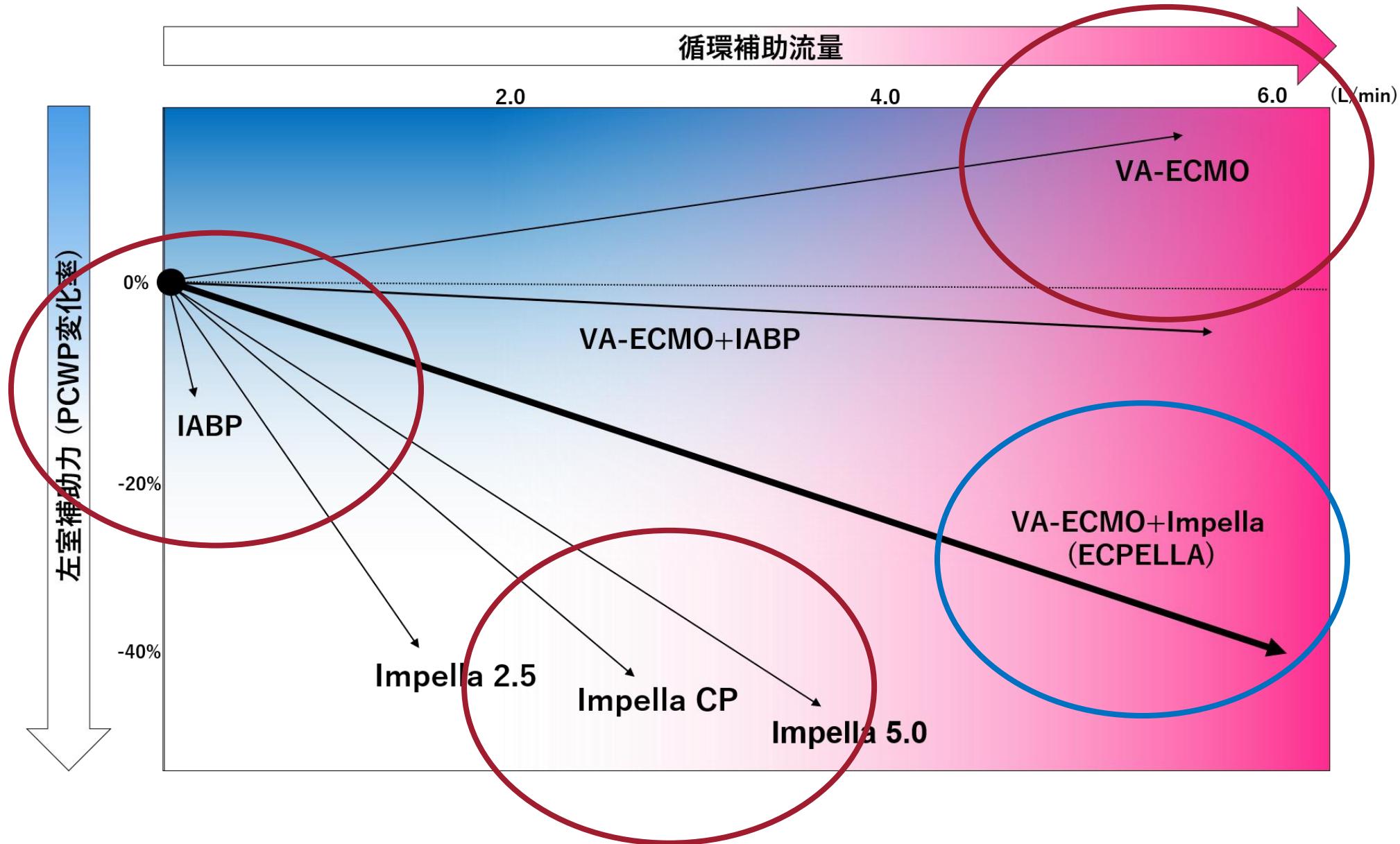
4.Impella

組み合わせ治療



ECMO+Impella

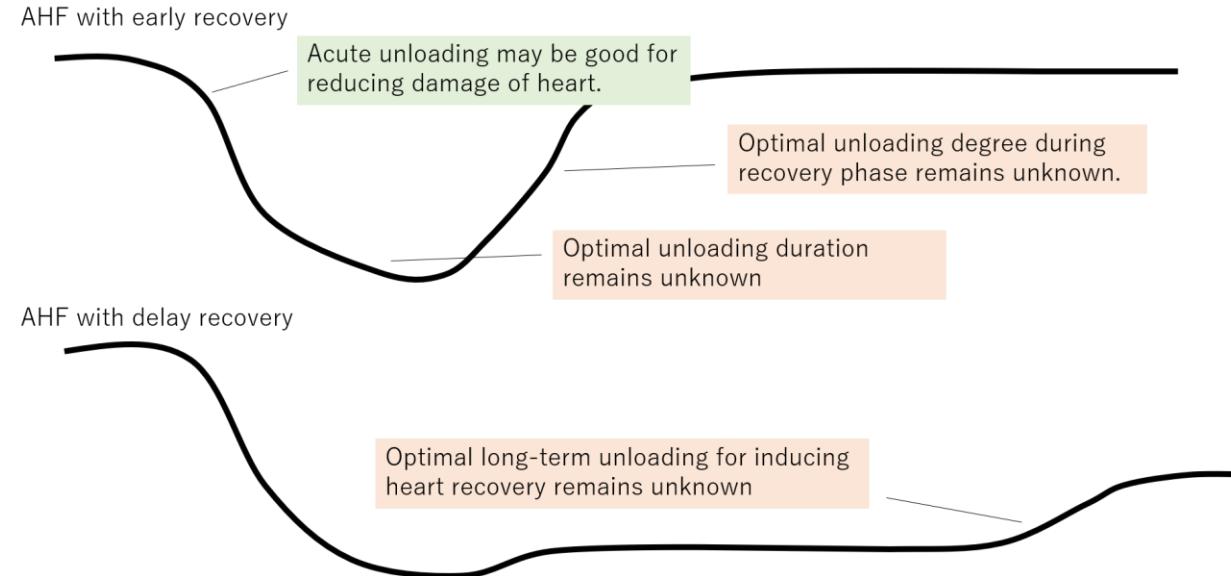




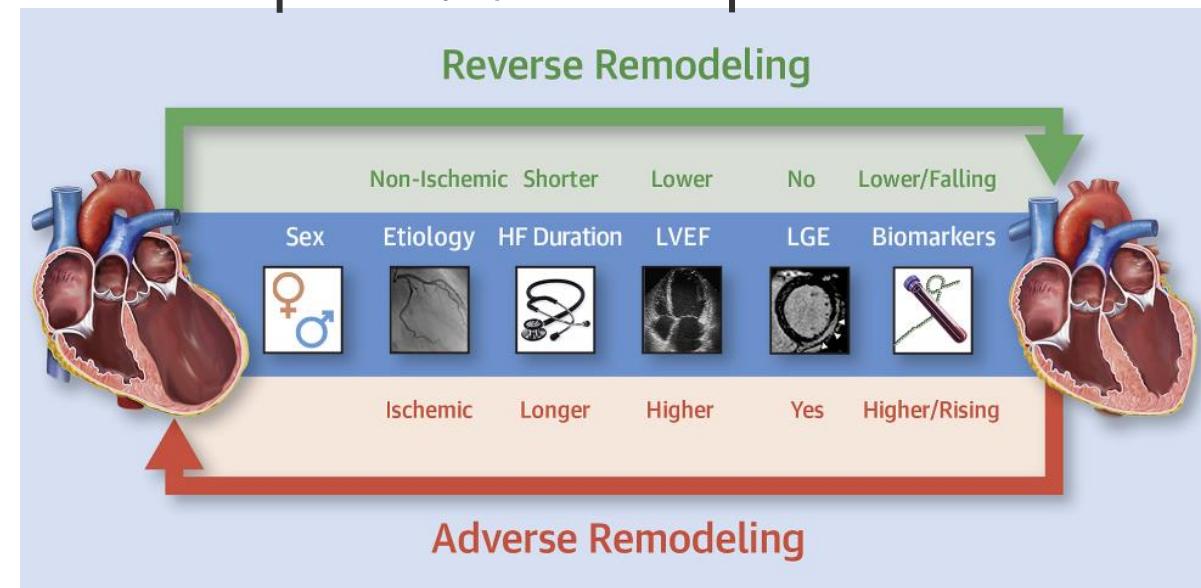
意味あるUnloadingって何だ？

心保護/Unload→心臓エナジエティクスの改善

心臓Unload



β遮断薬のResponder



心臓エナジエティクスの改善が意味ある病態は？
程度や期間を強めて最適化できる病態は？

まとめ

- 心臓エナジエティクスにおいてEFを知ることはすごく重要
- 薬剤でも補助循環でも心臓エナジエティクス改善という観点は共通した心保護、心機能改善メカニズムである