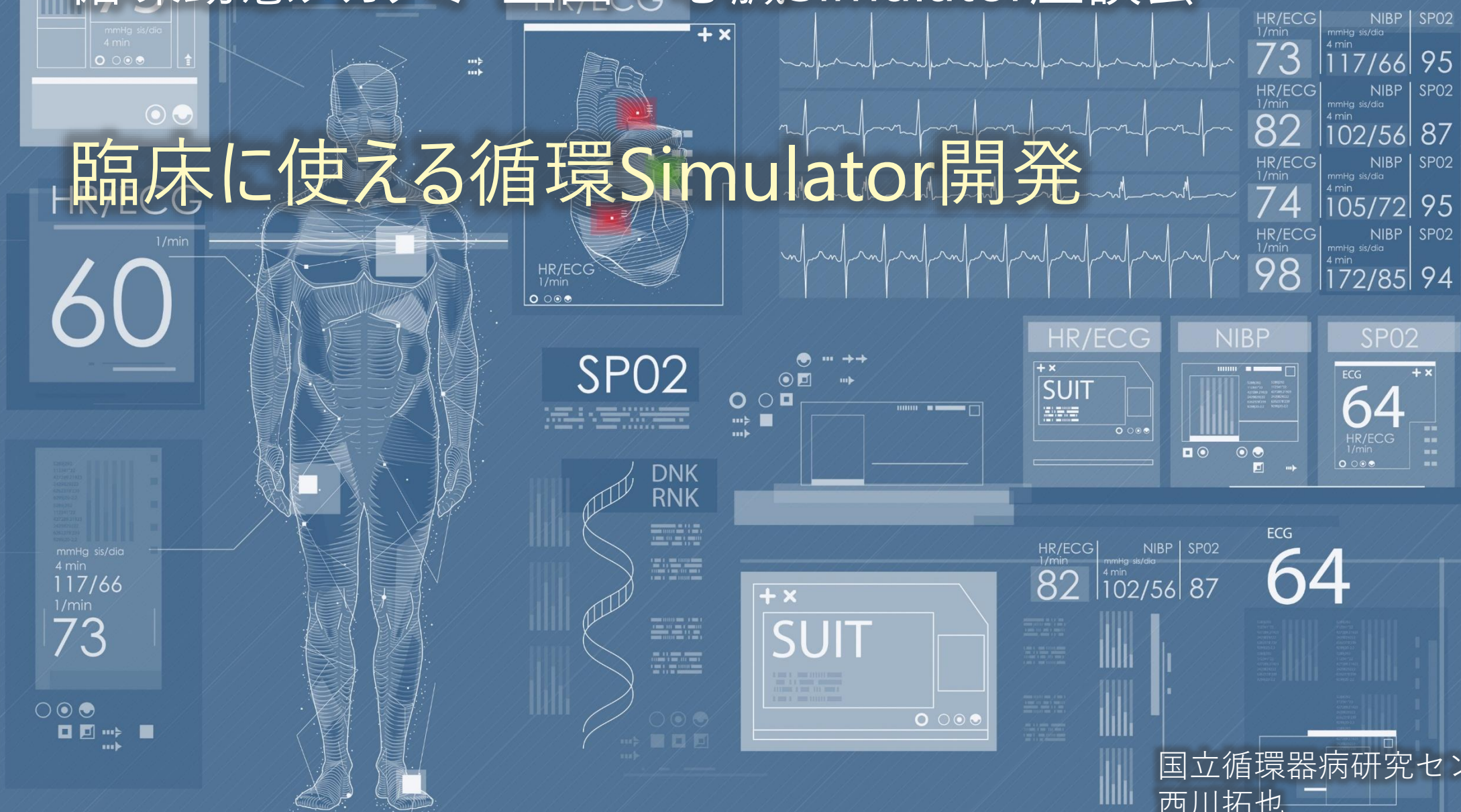


# 臨床に使える循環 Simulator 開発



錬金術、それは、  
物質を**理解**、**分解**、そして**再構築**する、  
この世界で最先端の科学である。

鋼の錬金術師より

シミュレーション、それは、  
循環を**理解**、**分解**、そして**再構築**する、  
この世界で最先端の科学である。

シミュレーション、それは、  
循環を**理解**、**分解**、そして**再構築**する、  
この世界で最先端の科学である。

循環を理解することは  
数式化することである



Daniel Burkhoff

# 循環シミュレーションってどうやるの？

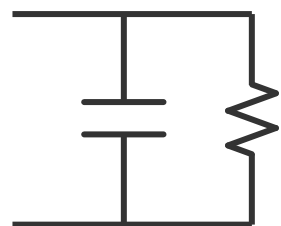
## 理解

### 循環動態



### 数理モデル

$$P = F \times R$$
$$V = C \times P$$



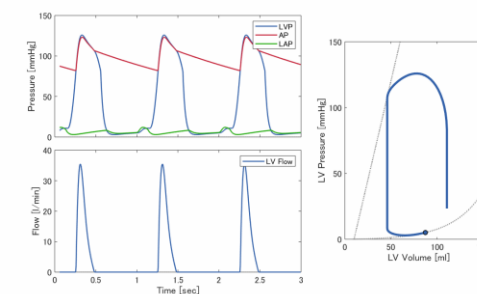
## 分解

### 要素パラメタ決定

要素	パラメタ
LVEes	2
RVEes	0.5
RS	1
RP	0.2
CS	1.5
CP	0.3

## 再構築

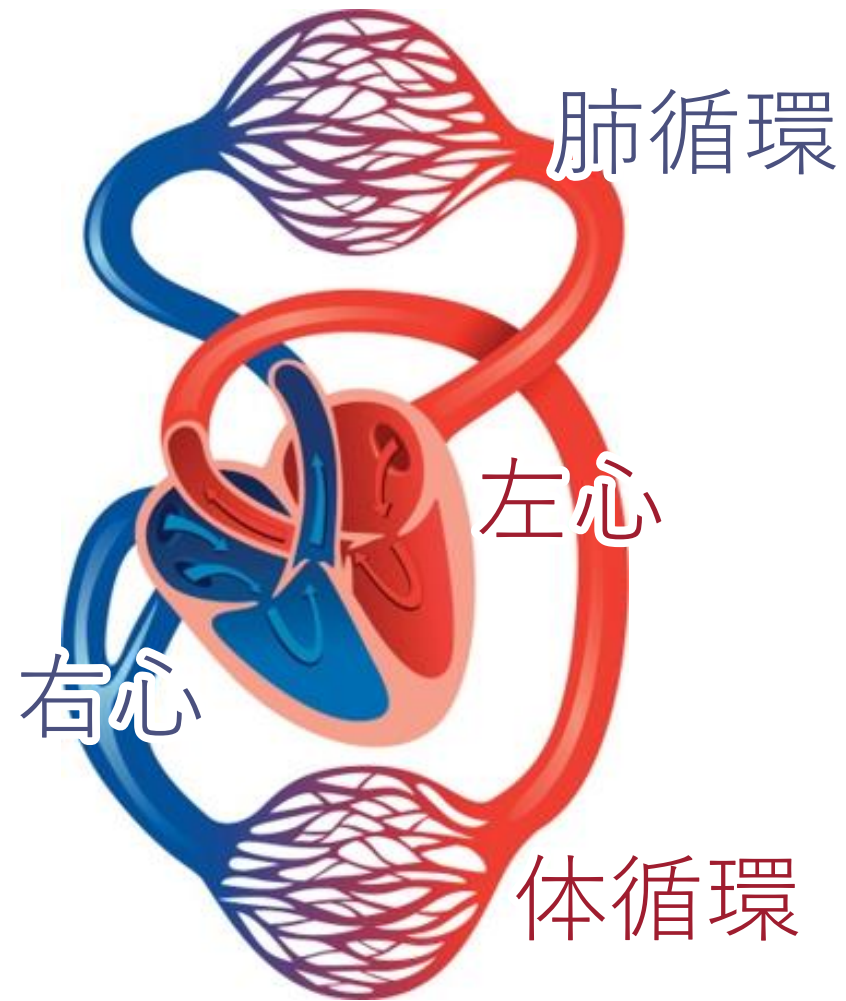
### 循環動態の再現



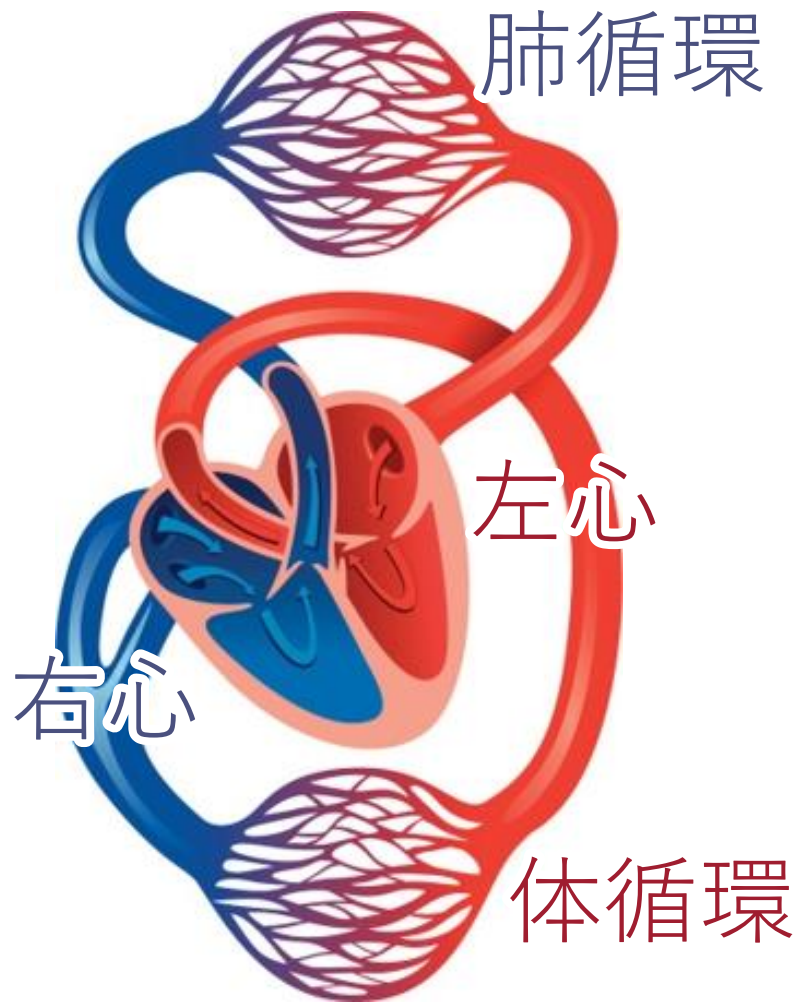
循環の理解が重要！！  
循環を決定する法則とは？

# 循環動態を決める法則は何か？

---

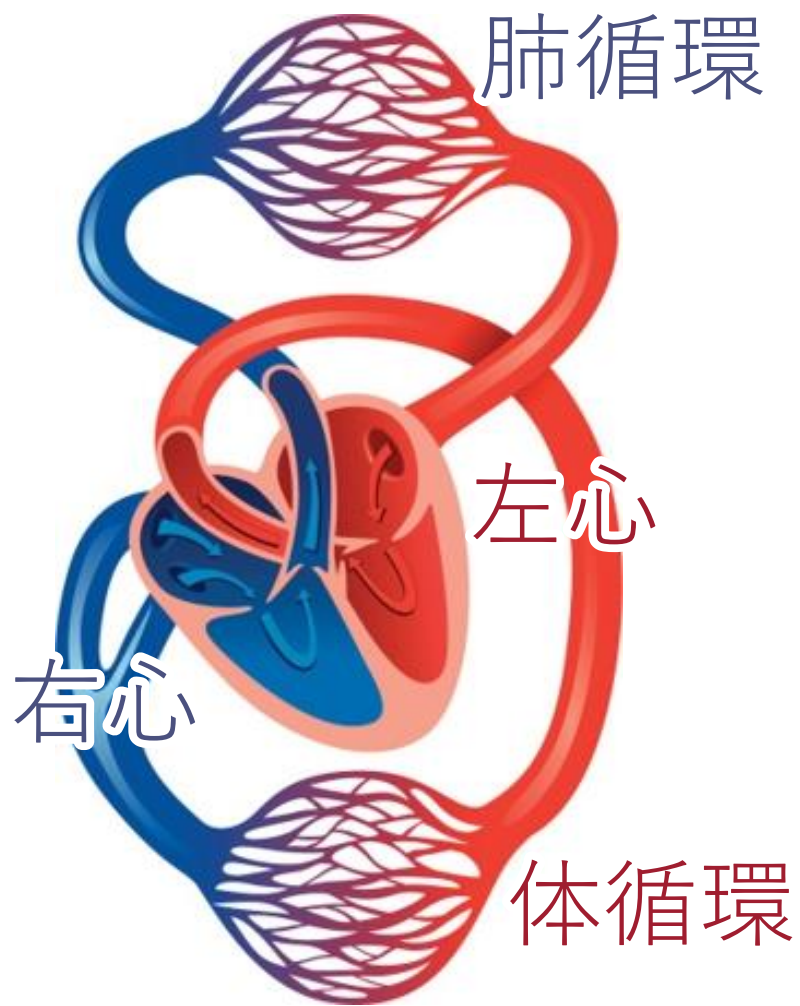


# 全身循環に共通するものは？



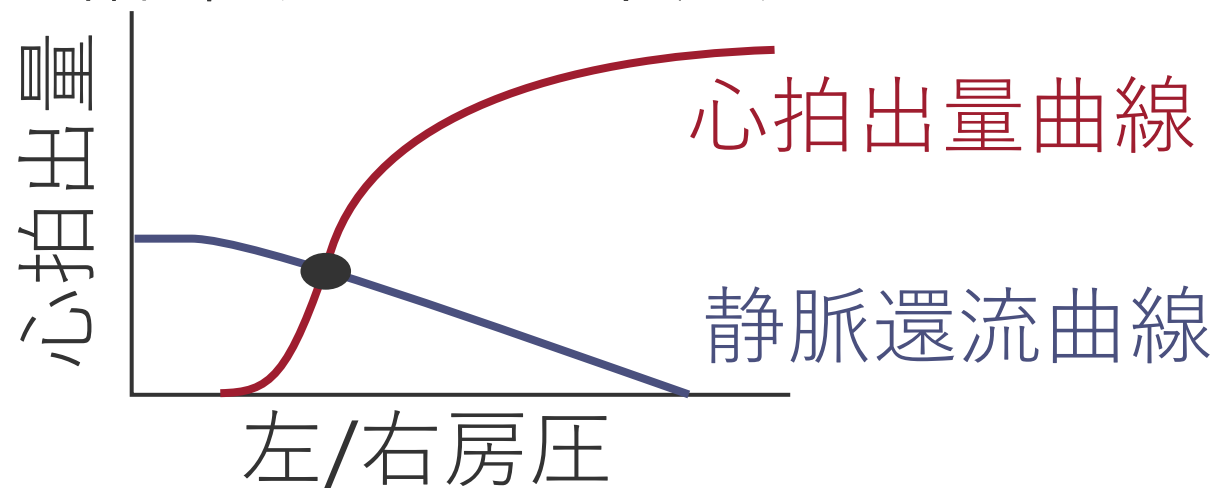
右心	肺循環	左心	体循環
右房圧	肺動脈圧	左房圧	大動脈圧
右室圧	左房圧	左室圧	右房圧
心拍出量	心拍出量	心拍出量	心拍出量

# 全身循環に共通するものは？



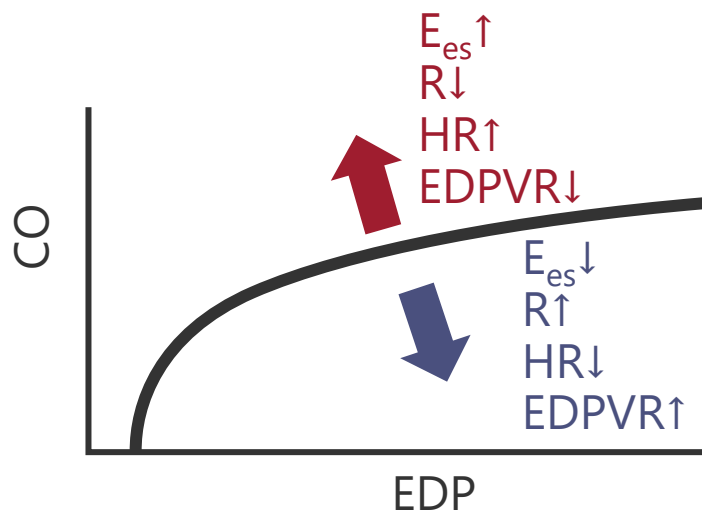
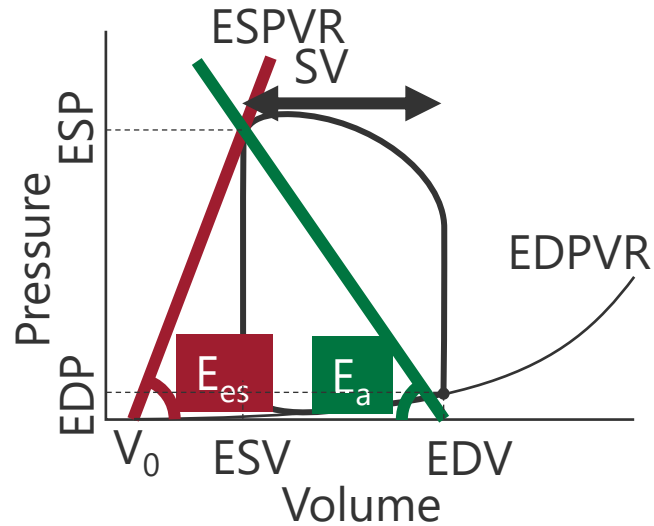
右心	肺循環	左心	体循環
右房圧	肺動脈圧	左房圧	大動脈圧
右室圧	左房圧	左室圧	右房圧
心拍出量	心拍出量	心拍出量	心拍出量

循環動態の基本法則





# 心拍出量曲線の法則はこれだ！



$$ESP \doteq AP = CO \cdot R$$

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

$$E_a = \frac{ESP}{SV} \doteq \frac{CO \cdot R}{SV} = R \cdot HR$$

$$SV \doteq \frac{E_{es}}{E_{es} + R \cdot HR} (EDV - V_0)$$

$$EDP = \alpha e^{\beta EDP} + \gamma$$

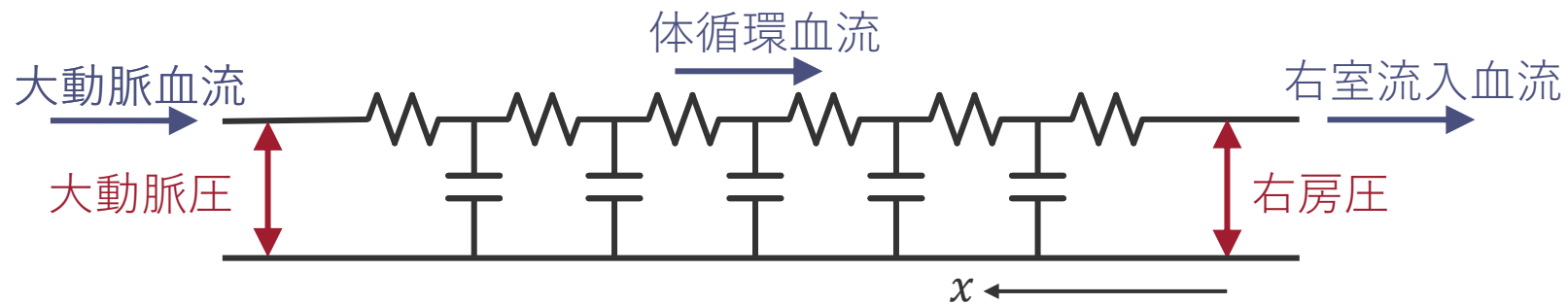
$$EDP \doteq \delta LAP$$

$$CO = \frac{1}{\beta} \frac{E_{es} \cdot HR}{E_{es} + R \cdot HR} \left( \log \left( LAP - \frac{\gamma}{\delta} \right) + \log \left( \frac{\delta}{\alpha} \right) - \beta V_0 \right)$$



$$CO = S_L (\log(LAP - F_L) + H_L)$$

# 静脈還流平面の法則はこれだ！



$$V(x) = C_S(x)(R_S(x) \cdot CO + RAP)$$

$$V_S = \int V(x)dx = C_{T,S} \int R_S(x)dx \cdot CO + C_{T,S}RAP$$

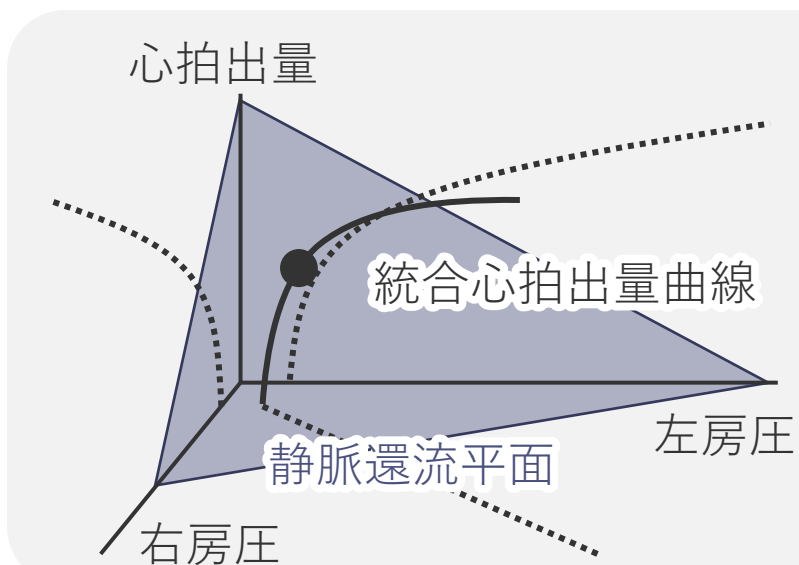
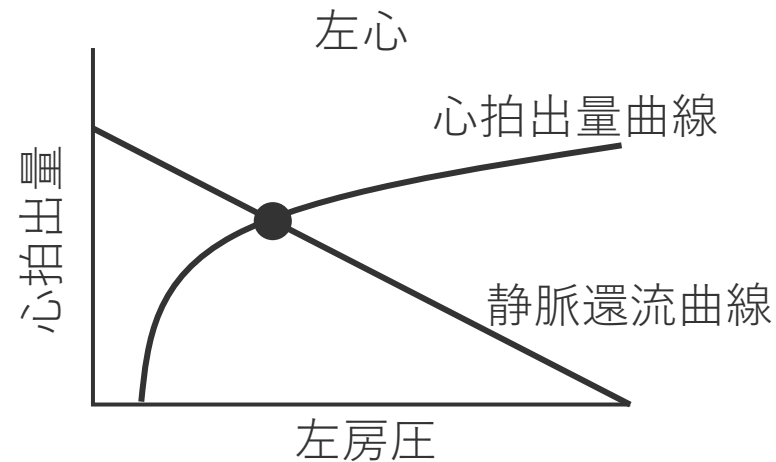
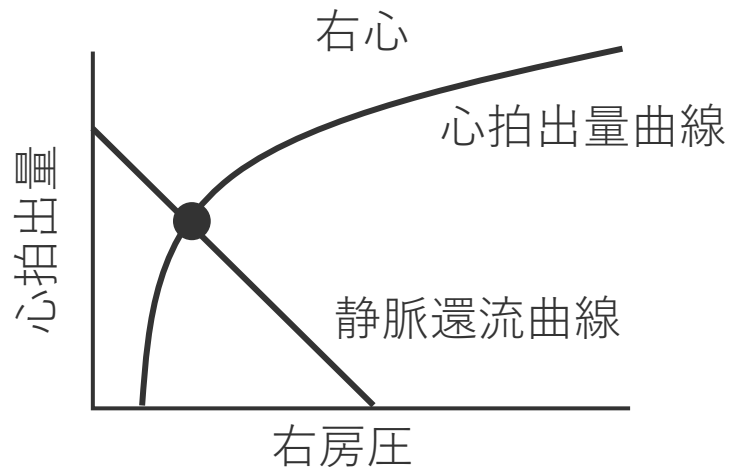
$$V_P = \int V(x)dx = C_{T,P} \int R_P(x)dx \cdot CO + C_{T,P}LAP$$

$$V_T = V_S + V_P$$



$$CO = \frac{V_T}{W} - (G_S RAP + G_P LAP)$$

# 体循環と肺循環を構成し、全身循環を再構築



$$CO = S_L (\log(LAP - F_L) + H_L)$$

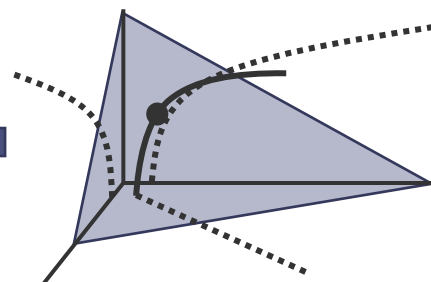
$$CO = S_R (\log(RAP - F_R) + H_R)$$

$$CO = \frac{V}{W} - (G_S RAP + G_P LAP)$$

# 循環シミュレータで何ができるのか？

循環動態データ

循環モデル



分解

定量評価



循環パラメータを定量化し  
循環の本質を見抜く！

再構築

予測



ある変化における  
循環動態を再現

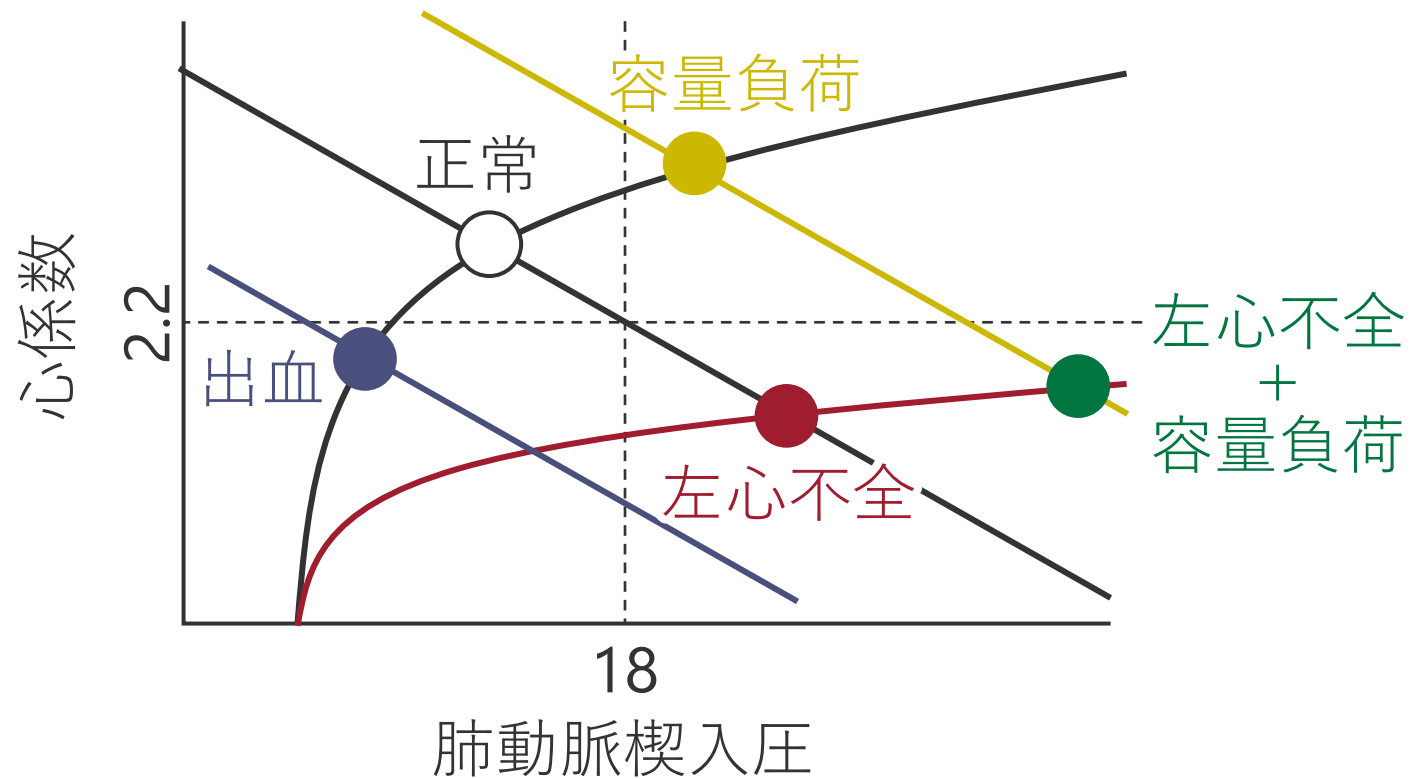
制御

治療



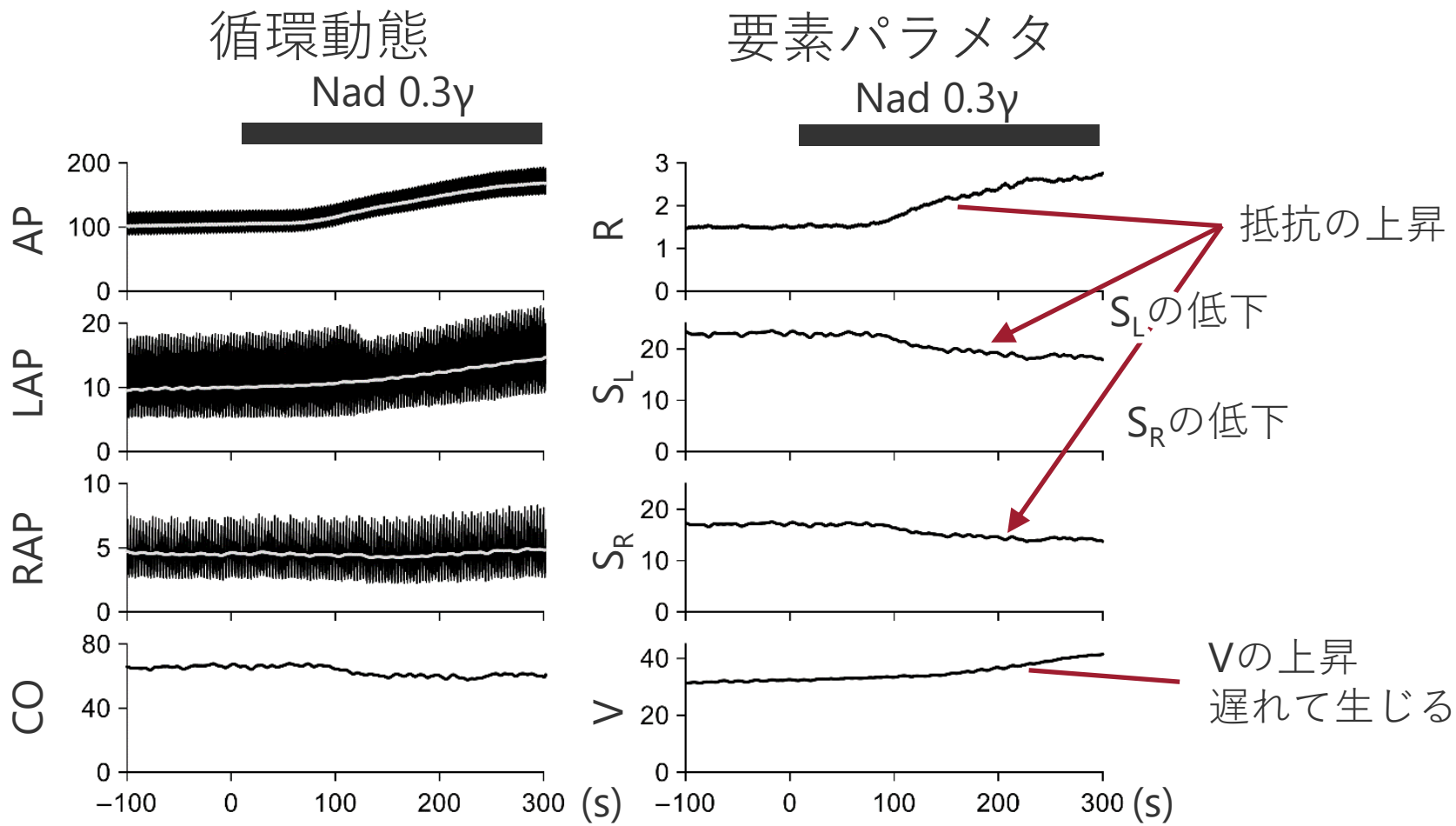
治療システムと統合し  
自動治療システム

# 循環要素の分解



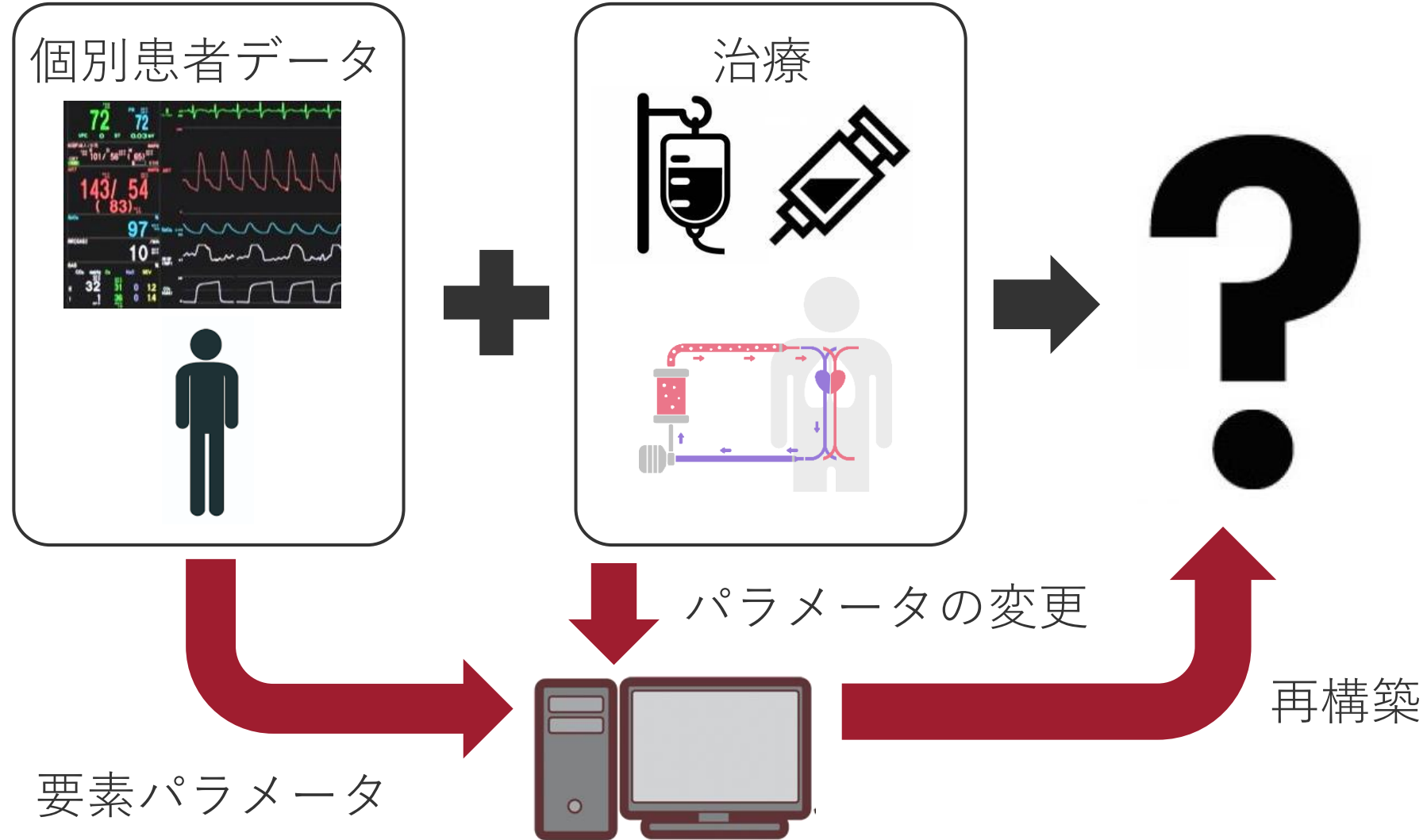
結果としての循環動態だけでなく、  
その原因となる要素を知ること  
で治療戦略に結びつく理解ができる

# 循環要素の分解



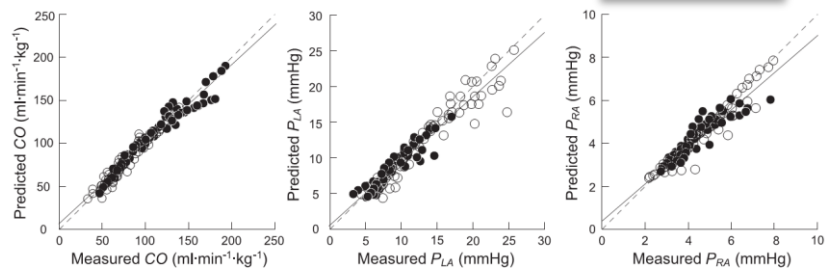
Nadは動脈抵抗を上げるだけでなく、負荷血液量も上昇させる

# 循環動態予測 (Prediction-based medicine)



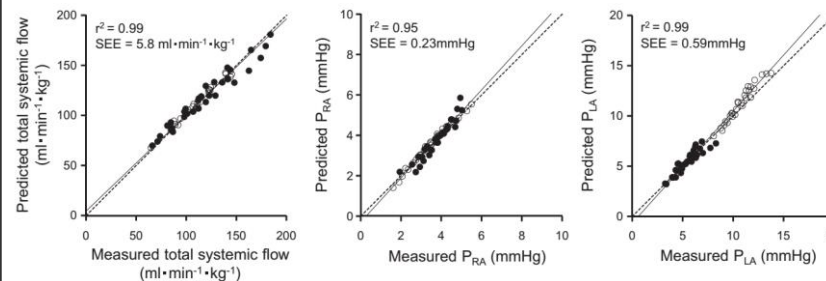
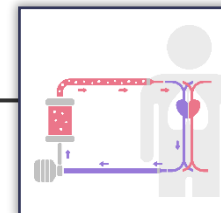
# 循環動態予測 (Prediction-based medicine)

## 輸液



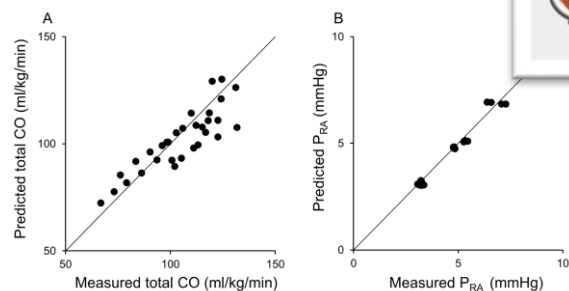
Uemura K et al. *Am J Physiol Heart Circ Physiol*. 2005

## 経皮的人工心肺



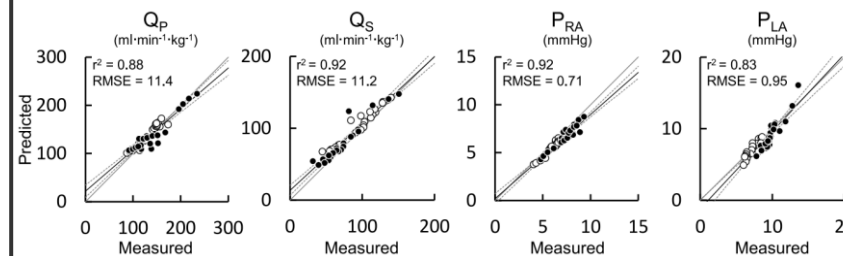
Sakamoto K et al. *Am J Physiol Heart Circ Physiol*. 2015

## 左室補助装置



Kakino T et al. *Am J Physiol Heart Circ Physiol*. 2016

## 心房間シャント



Nishikawa T et al. *ESC Heart Fail*. 2020

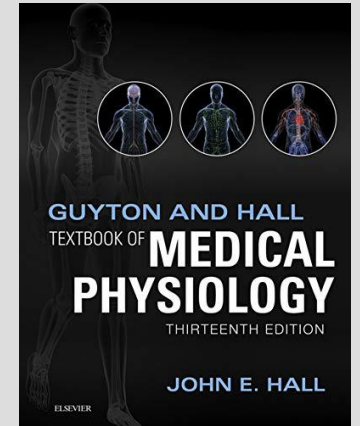


# アプリ化：Arthur君の誕生

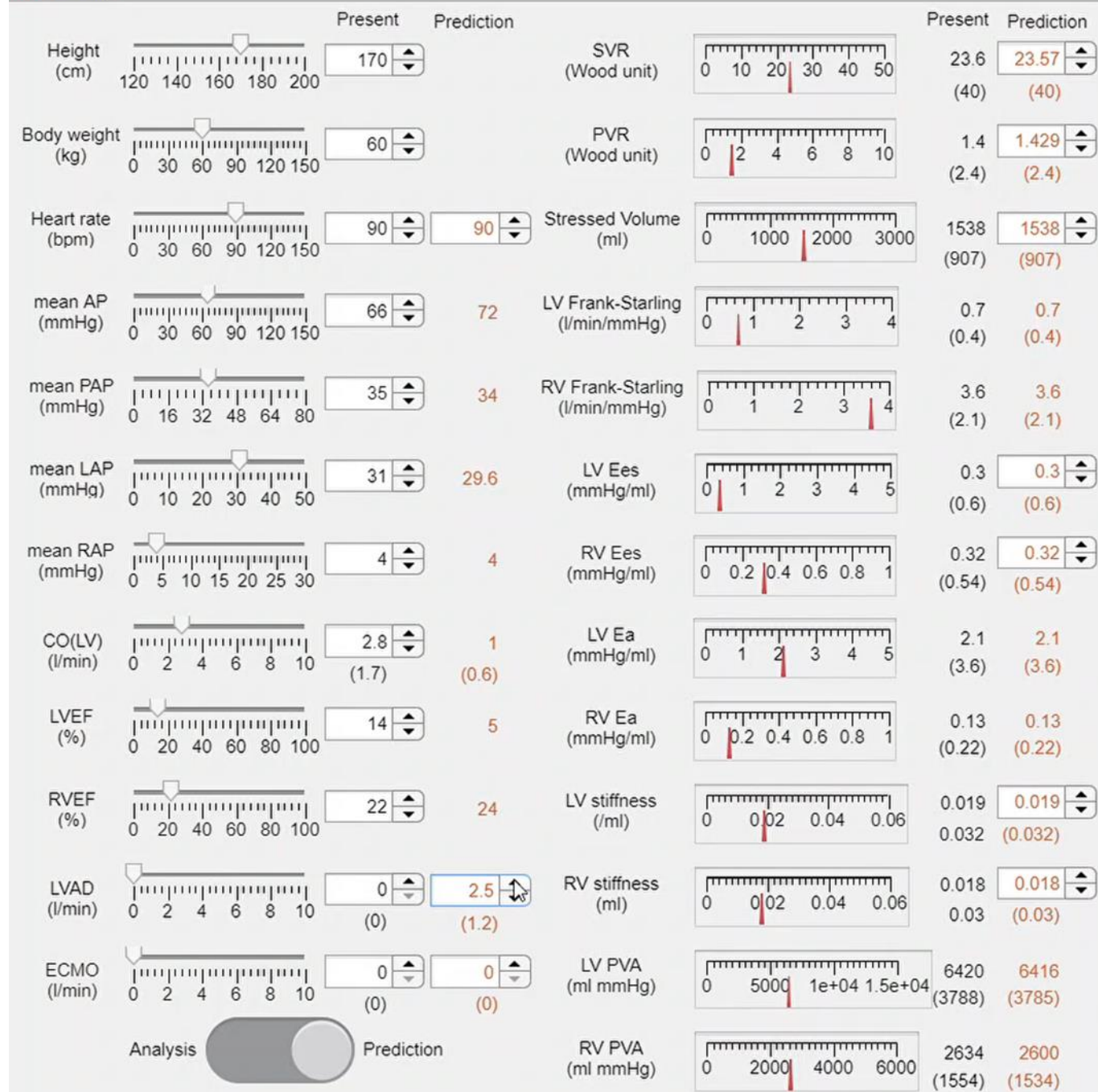
---



Arthur C. Guyton

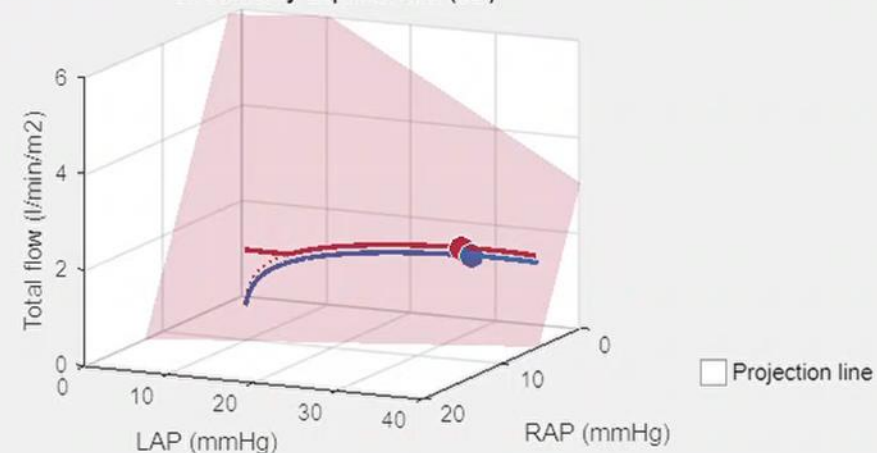


ガイトン生理学

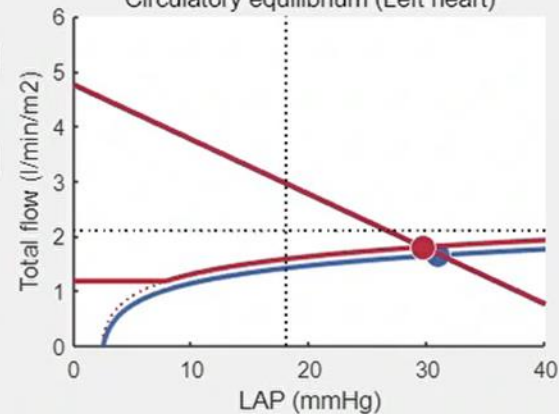
Analysis  Prediction

Mode Switch

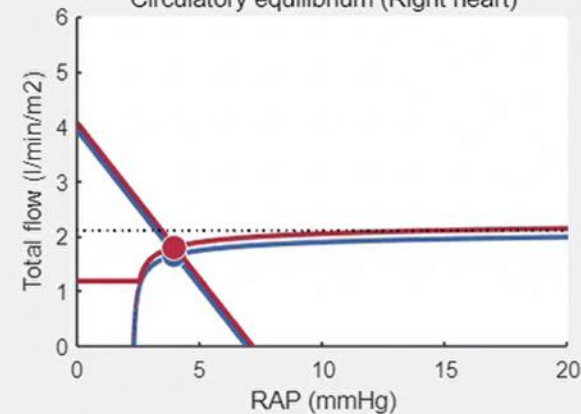
Circulatory Equilibrium (3D)



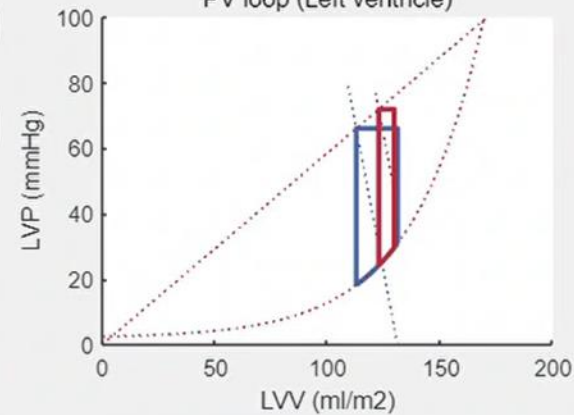
Circulatory equilibrium (Left heart)



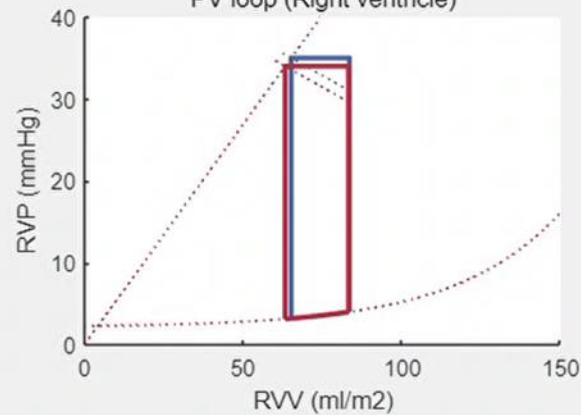
Circulatory equilibrium (Right heart)



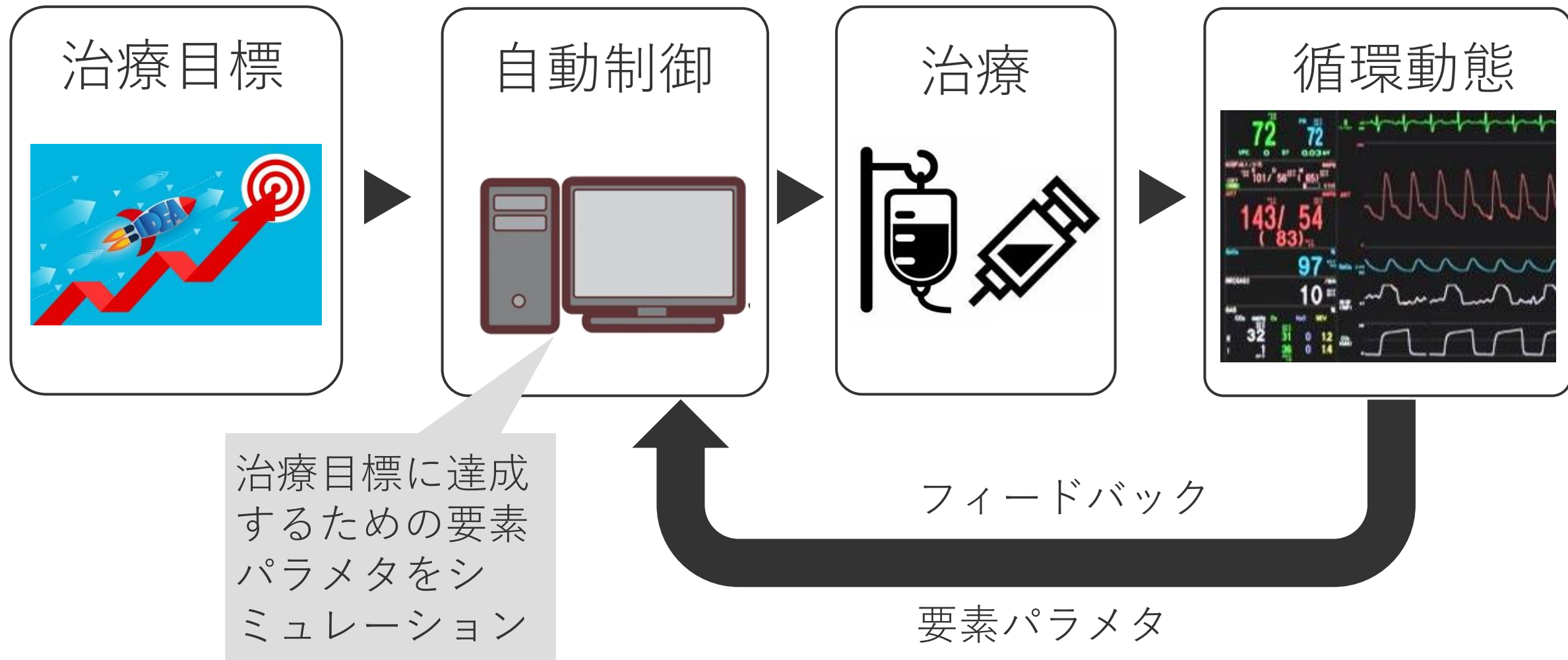
PV loop (Left ventricle)



PV loop (Right ventricle)

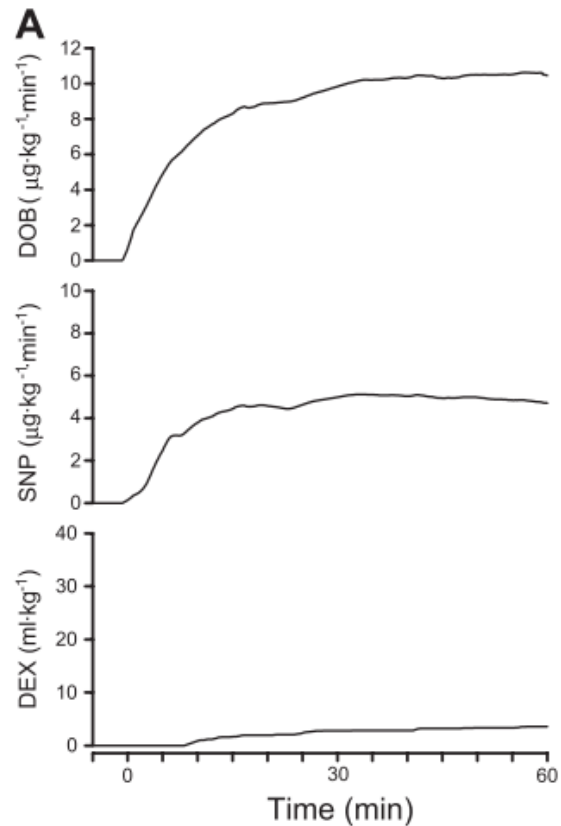


# 治療

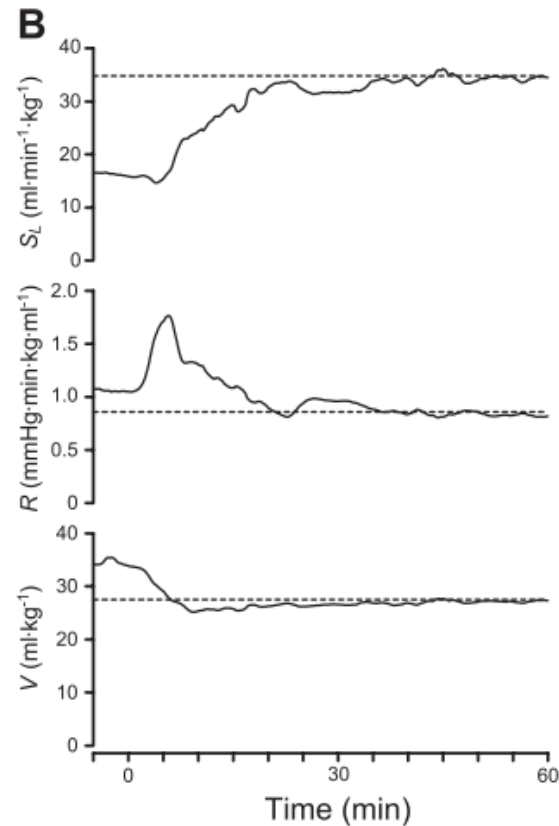


# 治療：急性心不全の自動治療

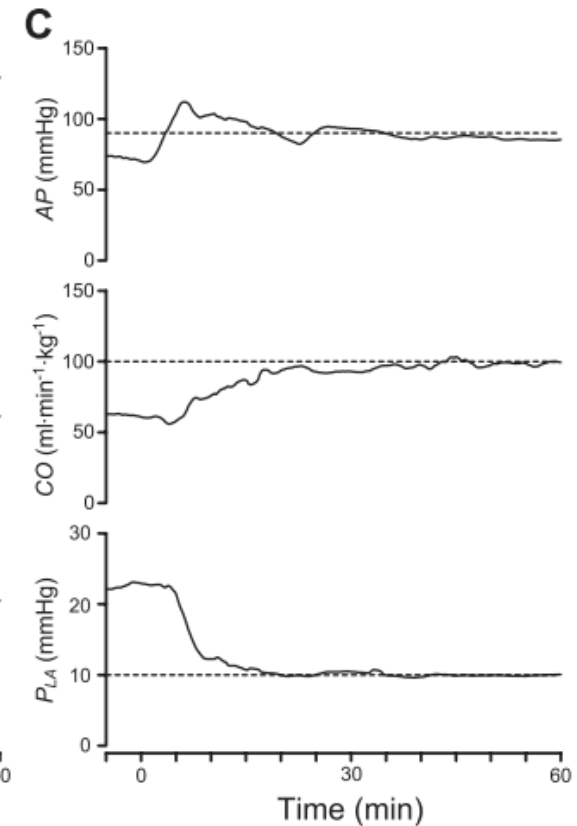
薬物自動投与



要素パラメータ



循環動態

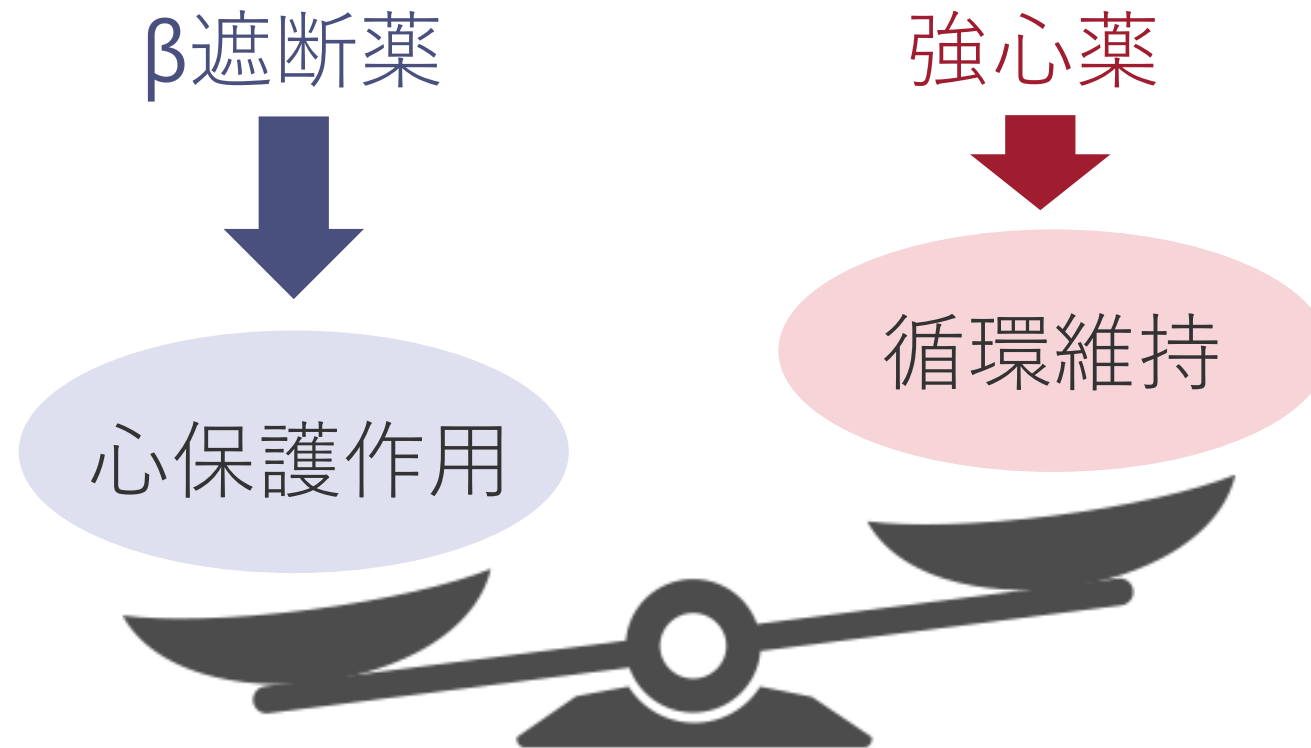


Uemura K et al. *J Appl Physiol.* 2006

複数の薬剤を同時に調整→15分で破綻した循環動態を正常に！

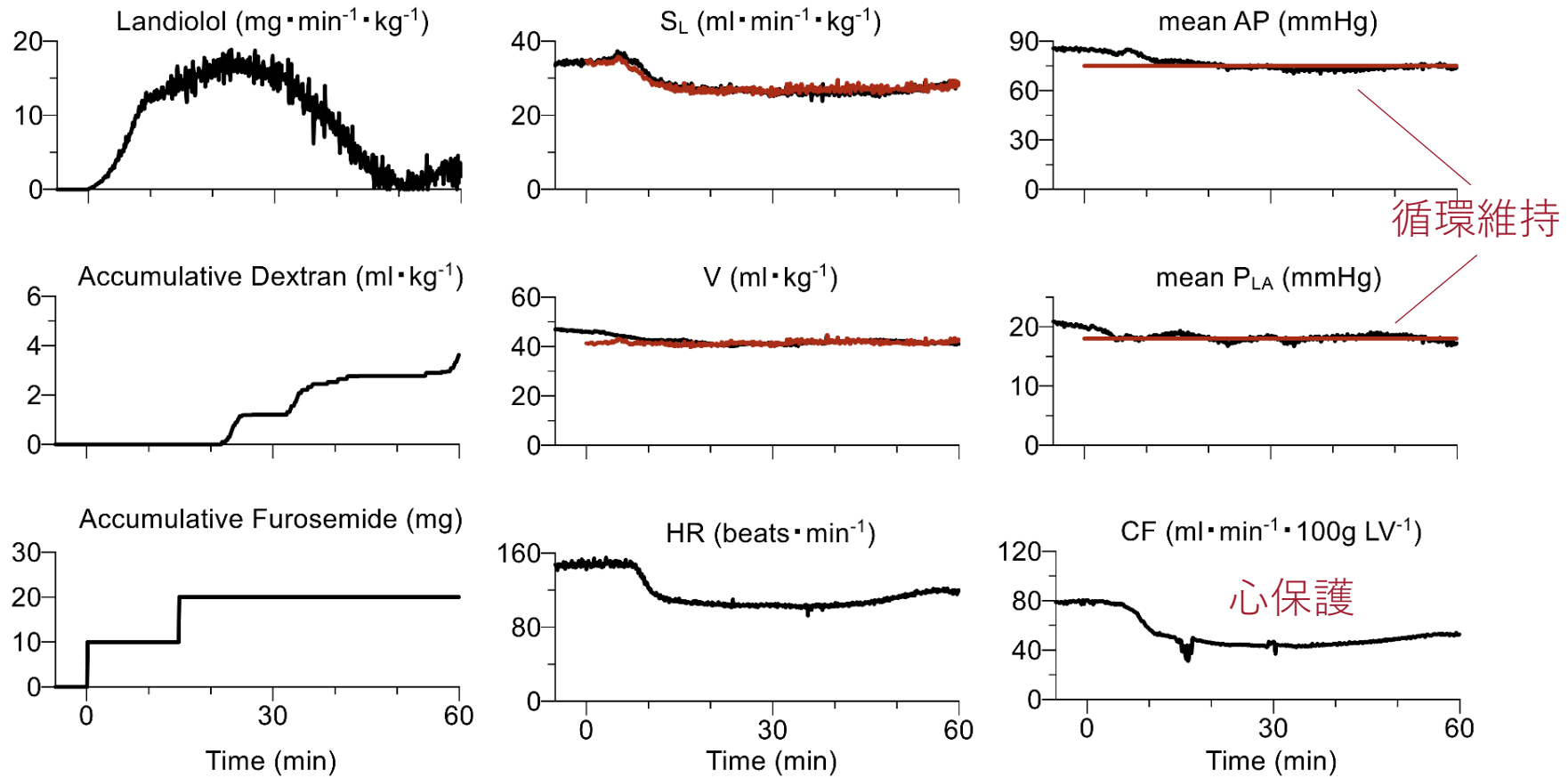
# 治療

---



手動では厳密な調整は困難

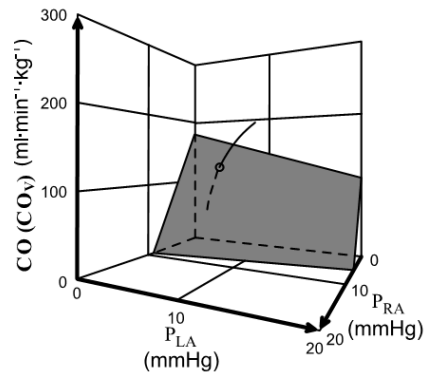
# 治療：循環破綻しない $\beta$ 遮断薬コントロール



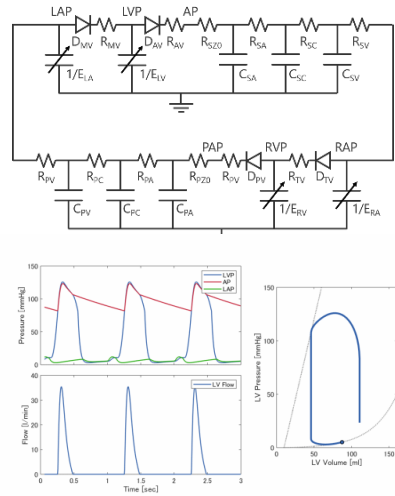
手動では不可能な厳密なコントロールを達成

# 最適モデルの選択

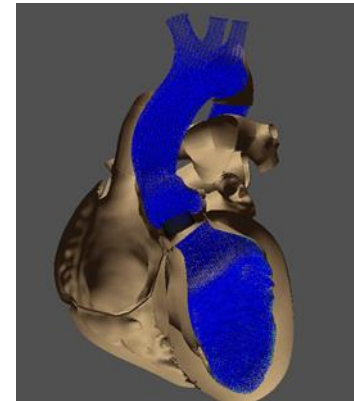
循環平衡モデル  
(心房圧、心拍出量)



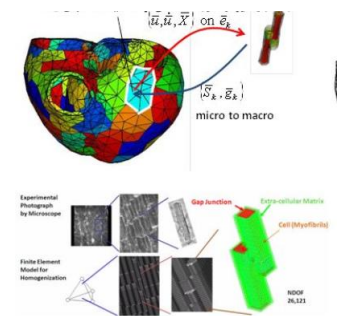
1Dモデル  
(圧、容積、流量)



3Dモデル



分子モデル



UT heart (University of Tokyo)

モデルの強固性/安定性

モデルの精密性

目的に応じた最良のモデルを選択

# FUTURE PERSPECTIVE

