

今さら聞けない血圧の秘密

血圧の隠れたメッセージ

循環制御システム研究機構
九州大学名誉教授

砂川 賢二



【共催セミナー C-6】

セッション名:再考！循環動態視点の血圧の話

企画趣旨:

血圧は心血管機能の総合値であるが、血圧の絶対値および変動を循環動態視点で語られる場面は少ない。本セッションでは、砂川賢二先生に今一度血圧というものを定義していただき、臨床で見ている血圧値や治療薬の効果を再考したい。

演者:砂川先生(循環制御システム研究機構)

座長:奥村先生(名古屋大)、末松先生(福岡大)

=====

今さら聞けない血圧の秘密

1. そもそも血圧とは
2. 血圧 = 抵抗 × 心拍出量の深い意味
3. 血圧波形の秘密
4. 血圧変動の秘密

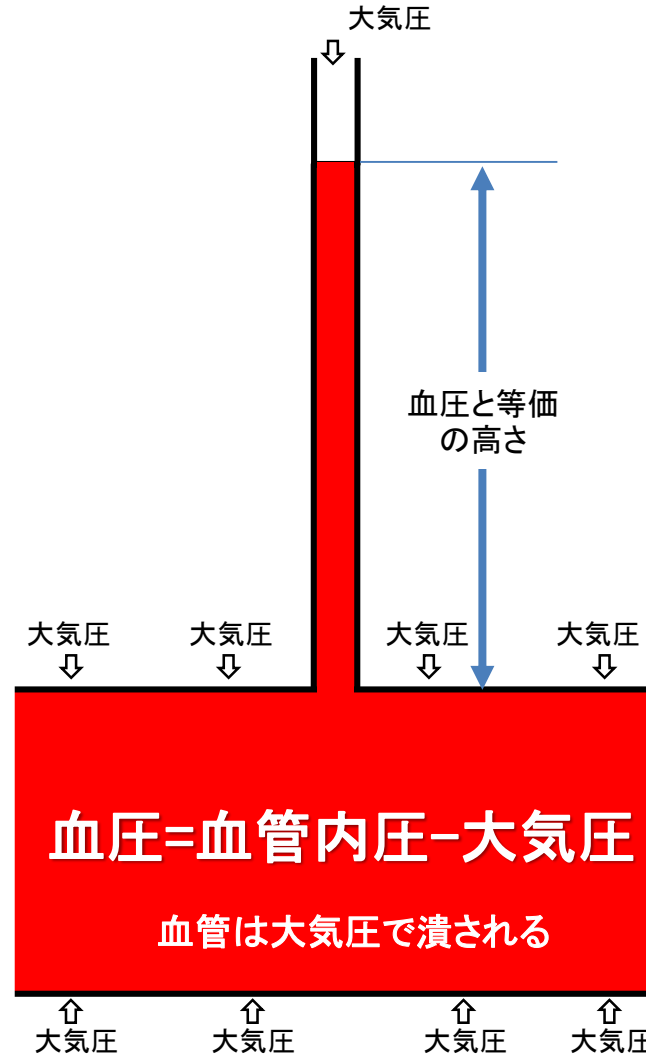


そもそも血圧とは何を測っているの？



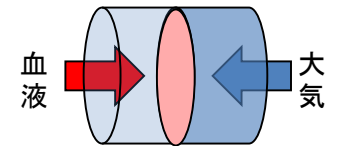
Hales S, 1733

血柱は2m近い。
この馬はきっと
高血圧！



水銀 120/80 mmHg
水 163/109 cmH₂O

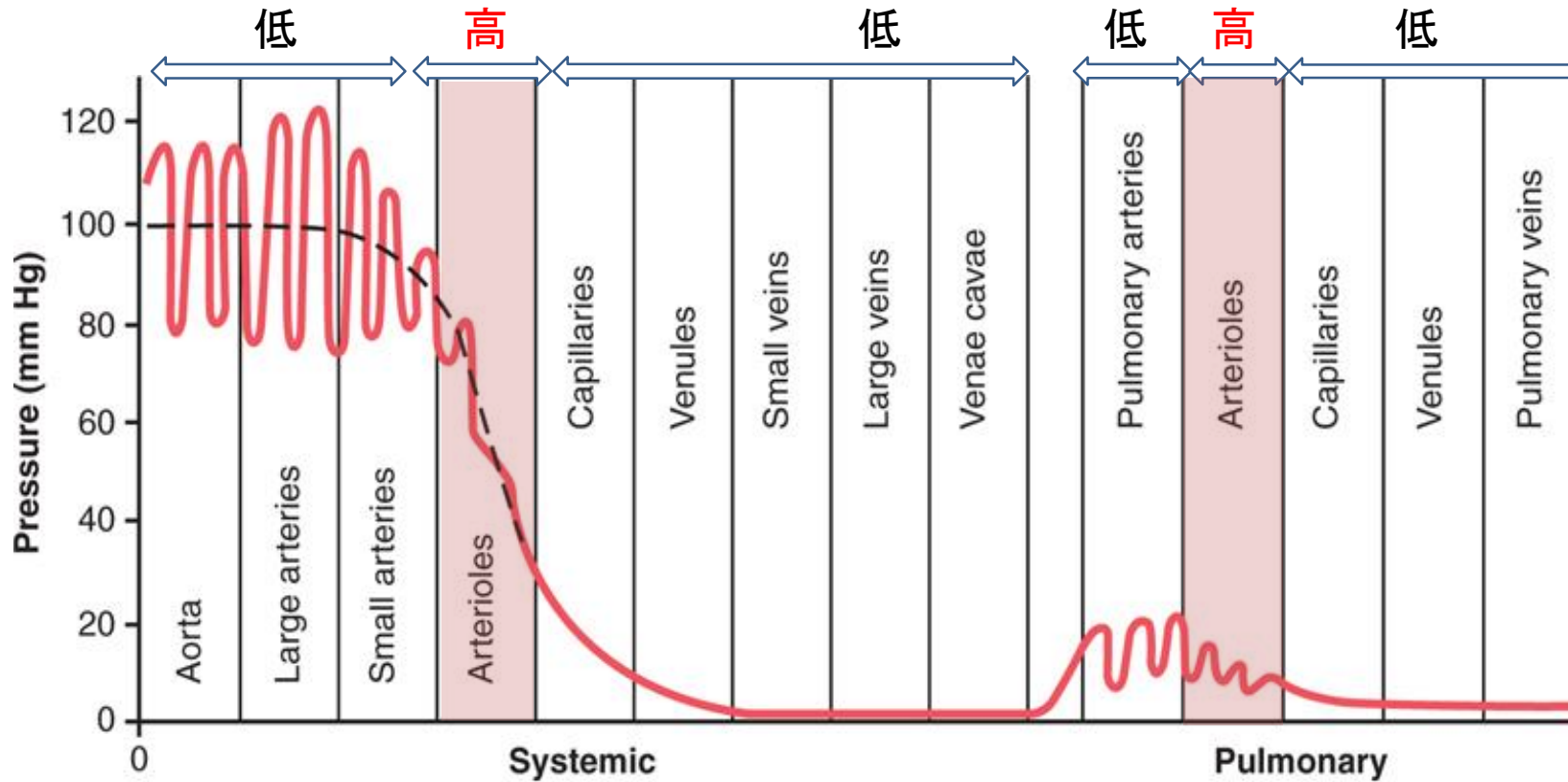
測定法



天気で血管内圧は大きく変わる。変動分は-70~70 mmHg.



血圧の部位差は抵抗分布の反映

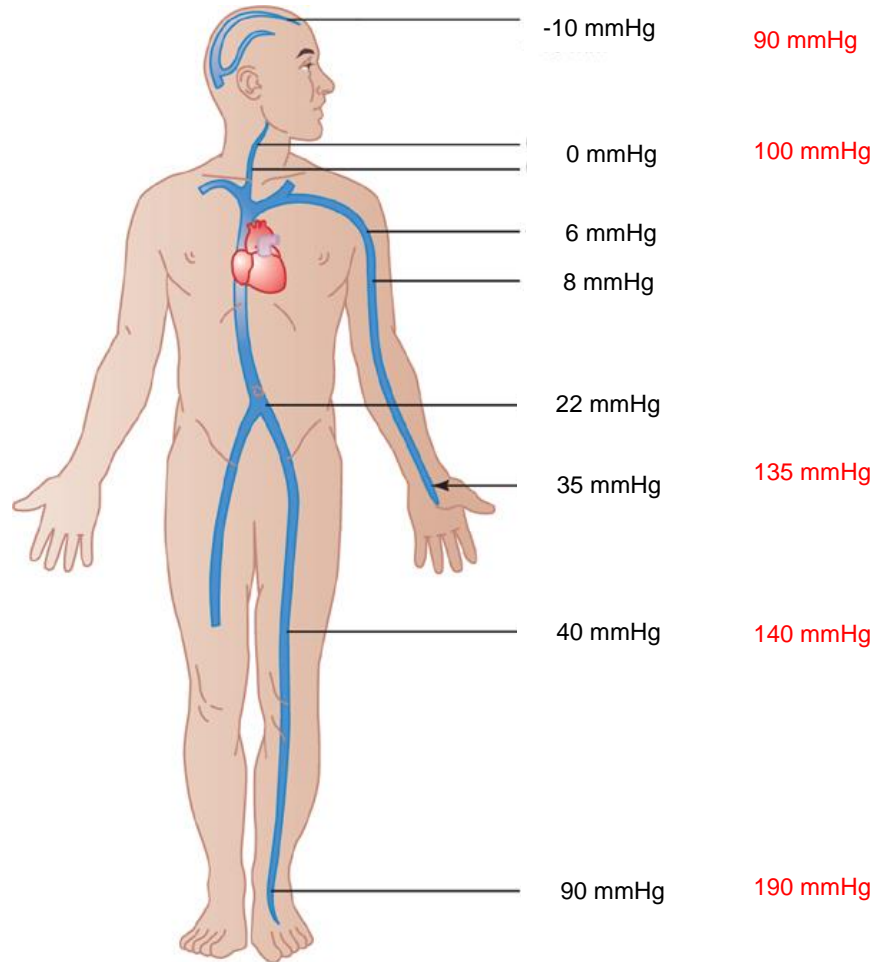


Hall: Guyton and Hall Textbook of Medical Physiology, 12th Edition
Copyright © 2011 by Saunders, an imprint of Elsevier, Inc. All rights reserved.

体循環と肺循環の血管の抵抗比は6/1程度。そのため、LVだけで循環の維持は可能 (Fontan)。



立位の血圧は重力により部位で異なる



Hall: Guyton and Hall Textbook of Medical Physiology, 12th Edition
Copyright © 2011 by Saunders, an imprint of Elsevier, Inc. All rights reserved.

重力の作用で

- 頭の先と足の先の血圧には身長に相当する静水圧の違いが出る
- 足先の血圧は 190 mmHg
- 足先の静脈圧は 90 mmHg
- 頭部の血圧 90 mmHg
- 下腿は動静脈圧が高いため、浮腫が出やすい

身長が10mを超えると、700 mmHgを超える血圧が必要。極端に背の高い動物がいないのはそのせいかも。

宇宙に行くとき急激に下肢の血液が中心部に移動。利尿がつくことで正常化。短期間に2~3 kg体重が減る。



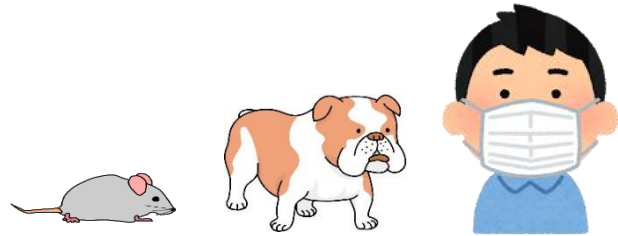
血圧の深い秘密

$$AP=R \times CO$$

1. 血圧に隠された自然の思惑
2. 心拍出量の需要と供給
3. RとCOの独立性
4. $CO=SV \times HR$. 頻脈で血圧は上がるか



血圧に隠された自然の思惑



$$AP=R \times CO$$

体重 (kg)	0.2	10	60
体重比	1/300	1/6	1.0
血圧 (mmHg)	100	100	100
心拍出量 (l/min)	0.4	1.0	5
心拍出量 (ml/min/kg)	200	100	83
抵抗 (mmHg/ml/min/kg)	0.5	1.0	1.20
G (ml/min/kg/mmHg)	2.0	1.0	0.83

- 300倍体重が変化しても血圧は一定
- 体重あたりの心拍出量(代謝量)はほぼ一定(300倍の体重変化に対してCOは最大3倍未満)
- 体重が増えると抵抗は減る(逆数のコンダクタンスは増える)
- 体重あたりのコンダクタンスはほぼ一定
- 体重あたりの血管の量(並列量)が一定
- 血圧100mmHgの説明はできず

$$AP = R \times CO$$

心拍出量の需要は何が決める

需要



燃料



- 基礎代謝 $\approx 25\text{kcal/kg/day}$ から W を求めると ($1\text{cal} = 4.18\text{J}$)
 $25 \cdot 10^3 \cdot 4.18 / (86.4 \cdot 10^3) = 1.21\text{W/kg}$
- 体重 60kg だと
 $1.21 \cdot 60 = 72.6 \sim 70\text{W}$



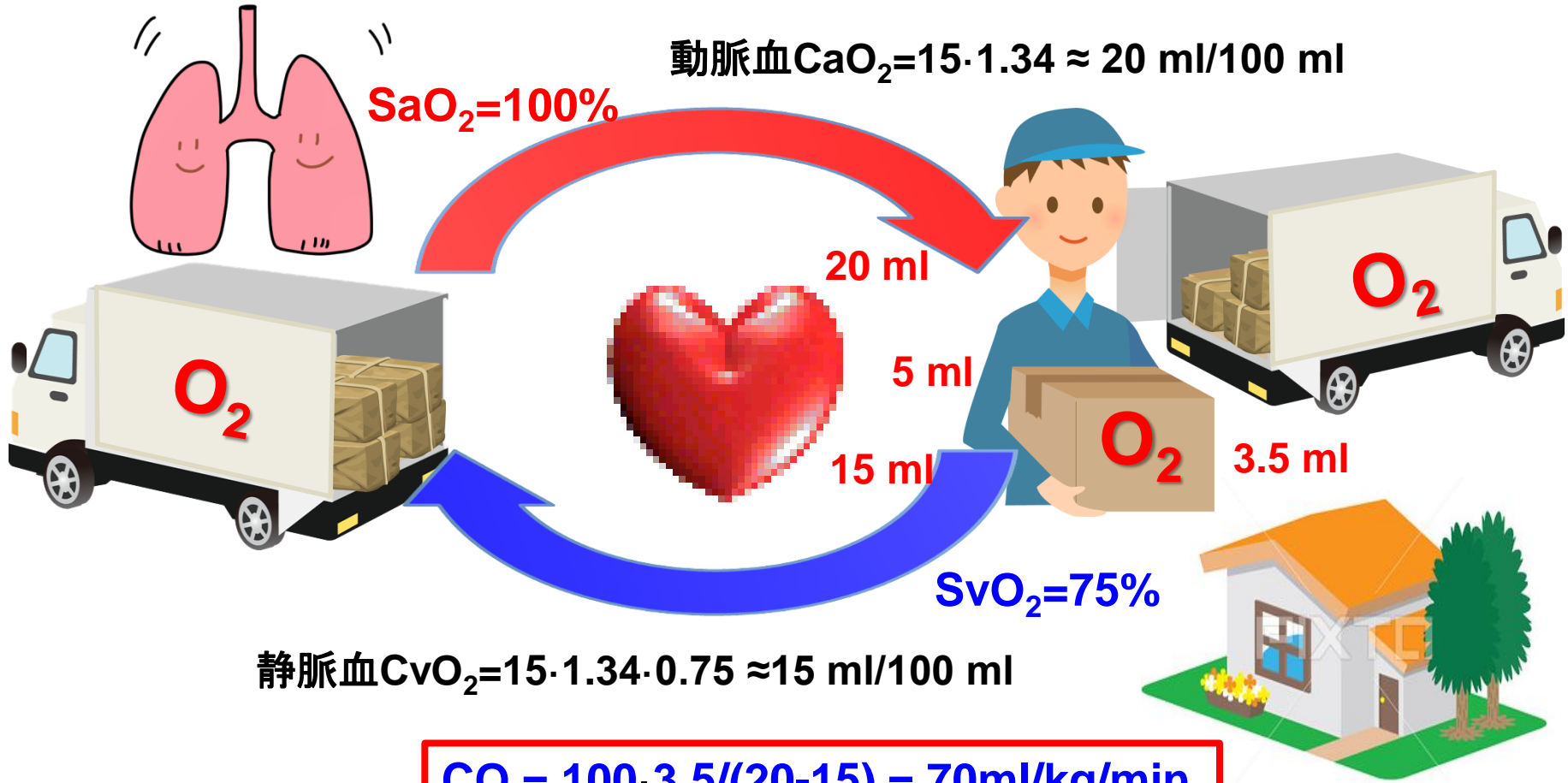
酸素



- 基礎代謝における O_2 必要量は ($1\text{ml } O_2 \approx 20\text{J}$ のエネルギー産生)
 $1.21 \cdot 60 / 20 \approx 3.5\text{ml/kg/min}$
 $= 1\text{ MET}$

AP=RxC0

心拍出量の需要を求める



$CO = 100 \cdot 3.5 / (20 - 15) = 70 \text{ ml/kg/min}$
 $= 70 \cdot 60 = 4.2 \text{ L/min/60kg}$

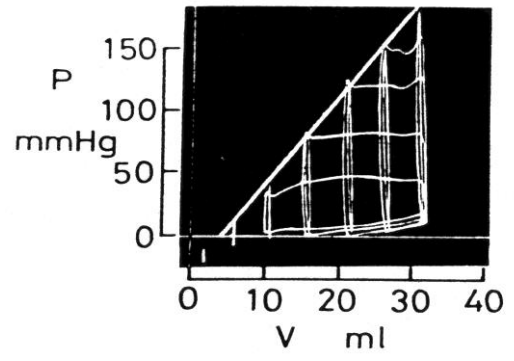
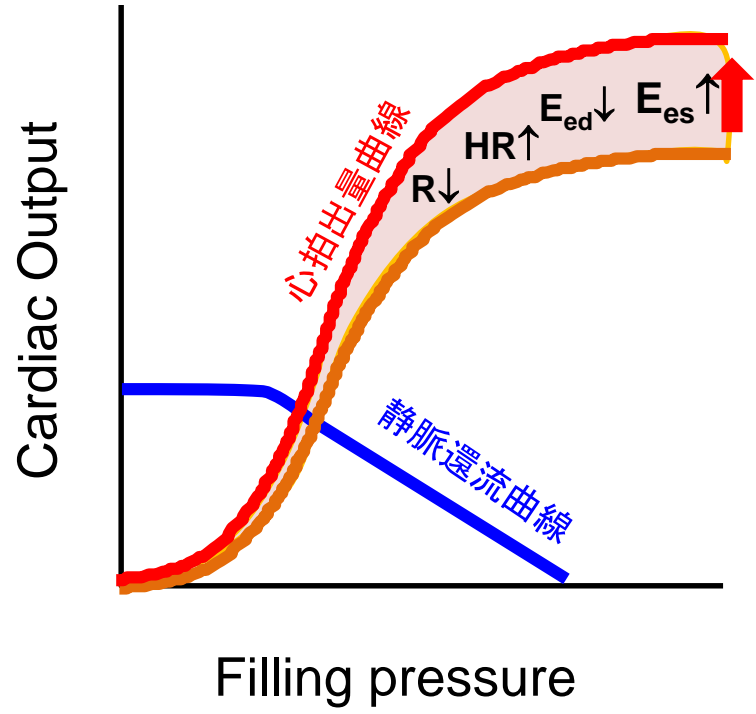
AP=R×CO

心拍出量を供給する仕組み



循環平衡で考えよう

CO曲線を圧容積で解く

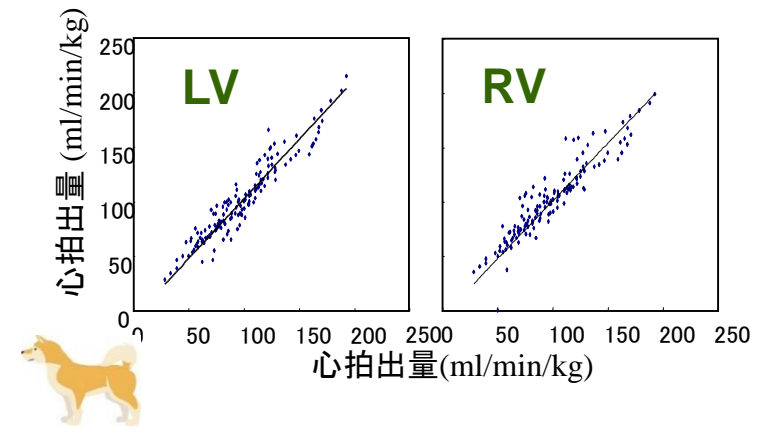
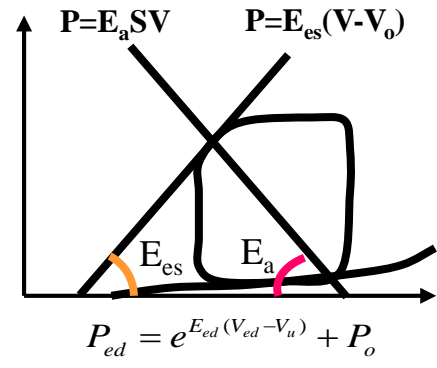


$$SV = \frac{E_{es}}{E_{es} + E_a} (V_{ed} - V_o) = \frac{E_{es}}{E_{es} + R/T} (V_{ed} - V_o)$$

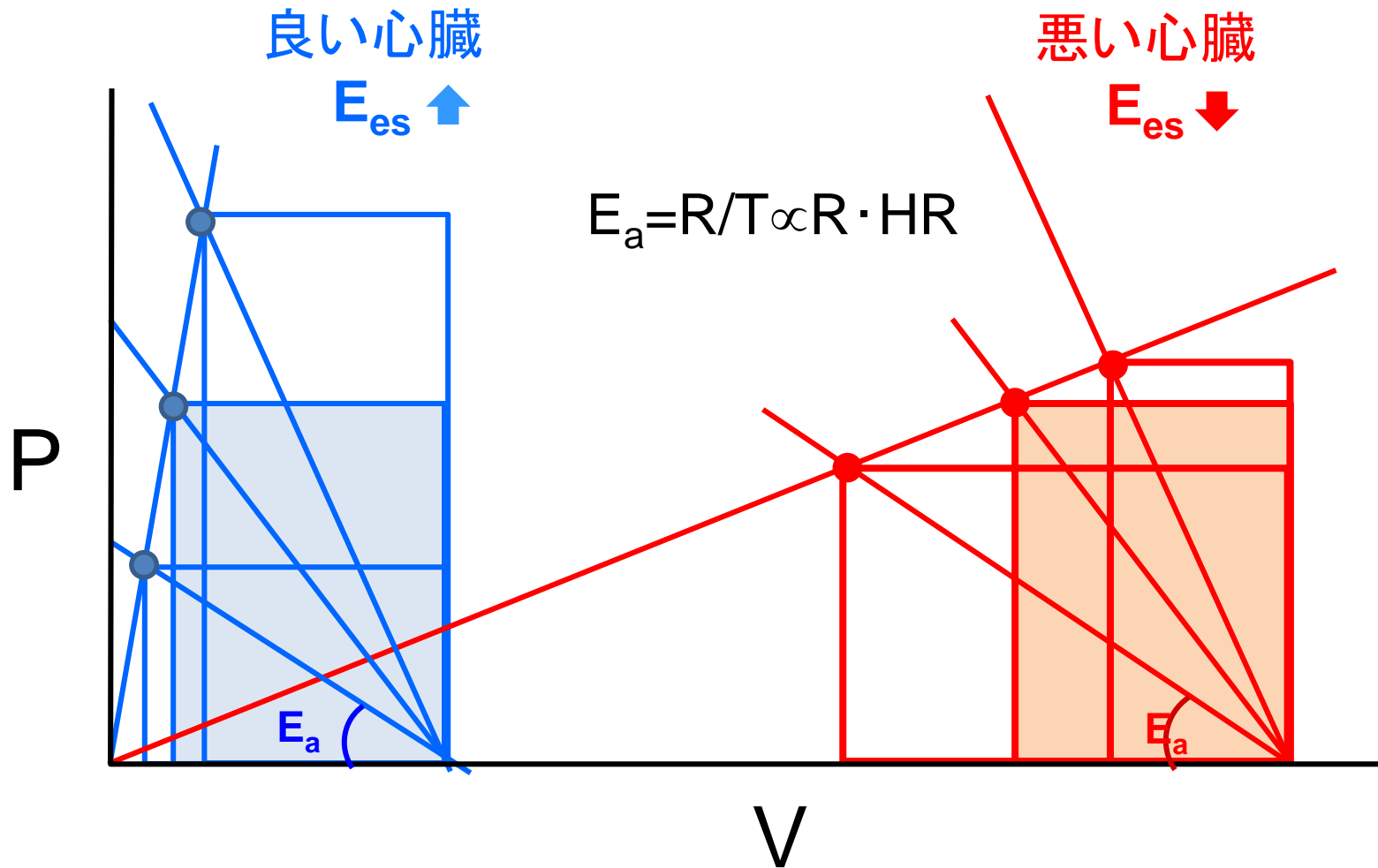
$$= EF_e (V_{ed} - V_o)$$

$$CO = HR \times EF_e (V_{ed} - V_o) = \frac{1}{\left(\frac{R}{60E_{es}} + \frac{1}{HR}\right)} (V_{ed} - V_o)$$

$$CO = \frac{1}{E_{ed} \left(\frac{R}{60E_{es}} + \frac{1}{HR}\right)} \{ \ln(P_{ed} - P_o) + E_{ed}(V_u - V_o) \}$$



AP=R×CO なれどRとCOに独立性はない



AP=R×CO

- 心機能 (E_{es}) がよければRが変化してもSV(CO)の変化は少ない。血圧は大きく変化する(血流ポンプ、 E_{es} 無限大だとCOはR非依存)。
- 心機能が悪ければ、血管抵抗の増加で心拍終了は大きく減少する。血圧の変化は細小に抑えられる(血圧ポンプ、 $E_{es}=0$ だと心拍出量のみ変化し、血圧はR非依存)。

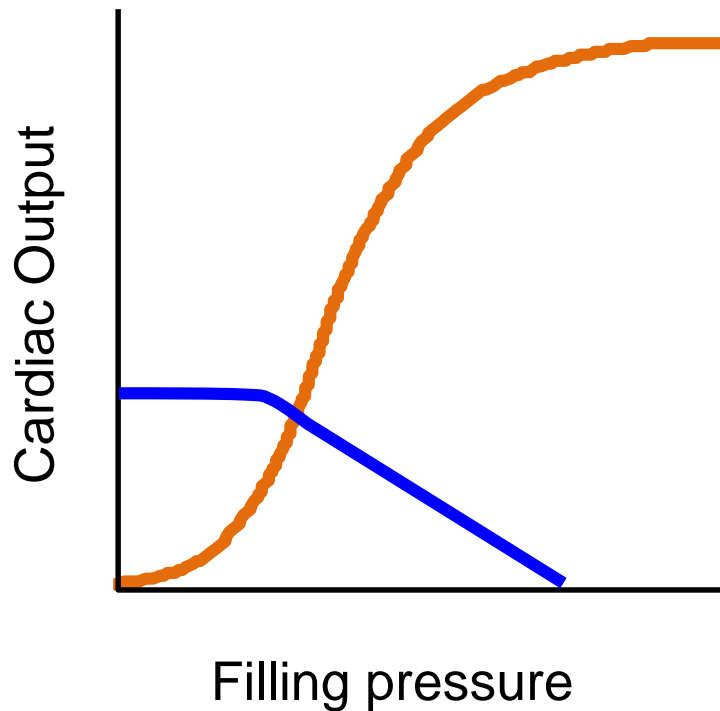
CO=SV×HR 頻脈でCOは増えるか



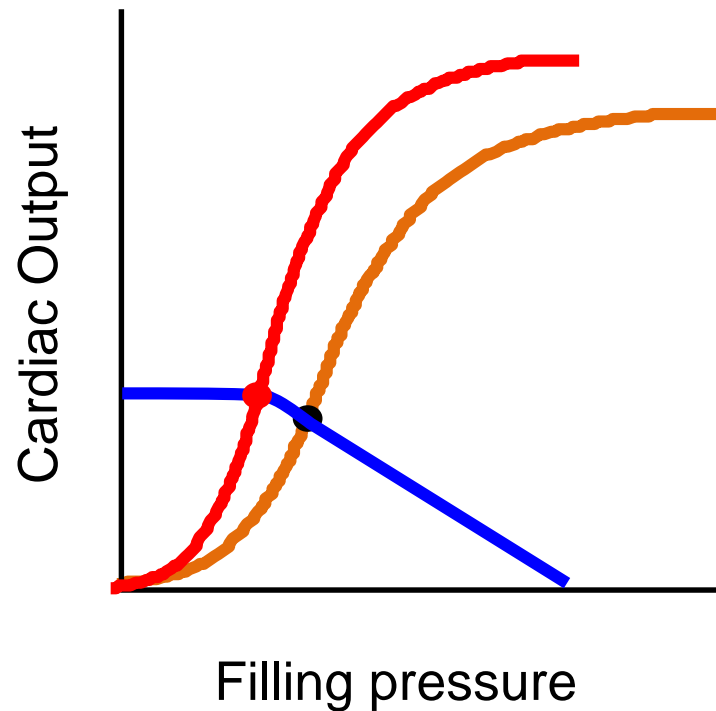
循環平衡で考えよう

$$AP=R \times CO$$

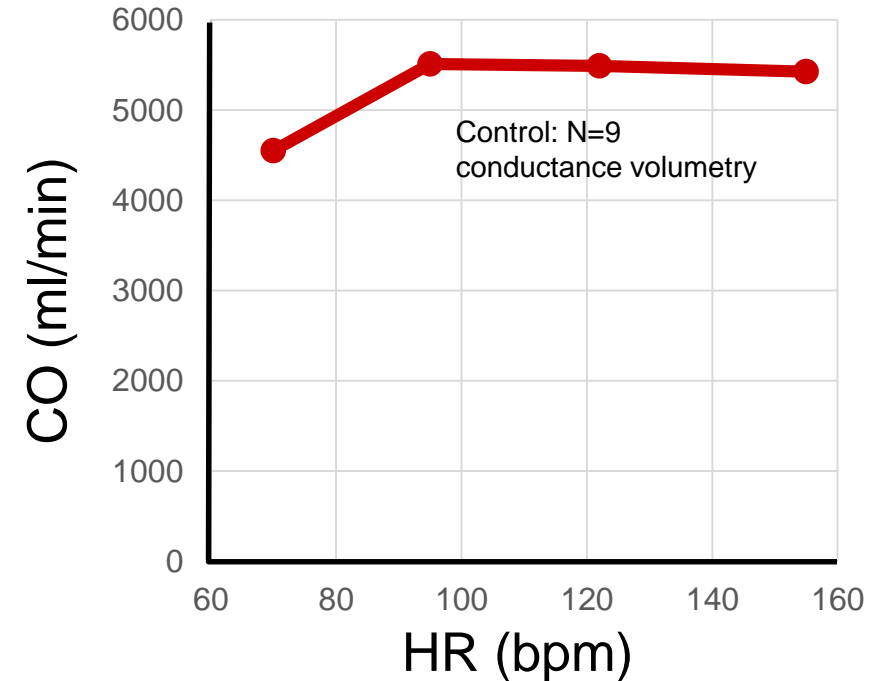
健常



頻脈

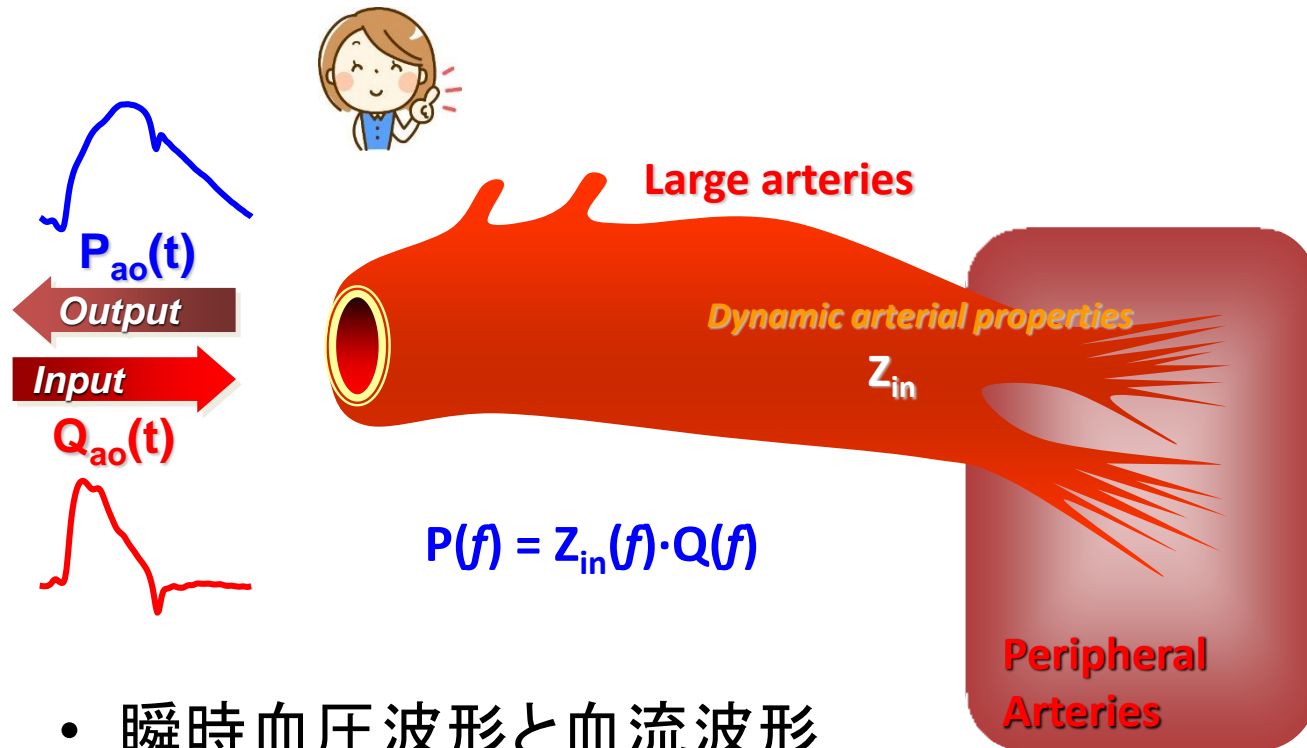


患者



modified from Kass Circulation 1993

血圧波形の秘密：インピーダンス



- 抵抗 = 平均血圧 / 平均血流
- インピーダンス = 周波数依存の血圧と血流の比

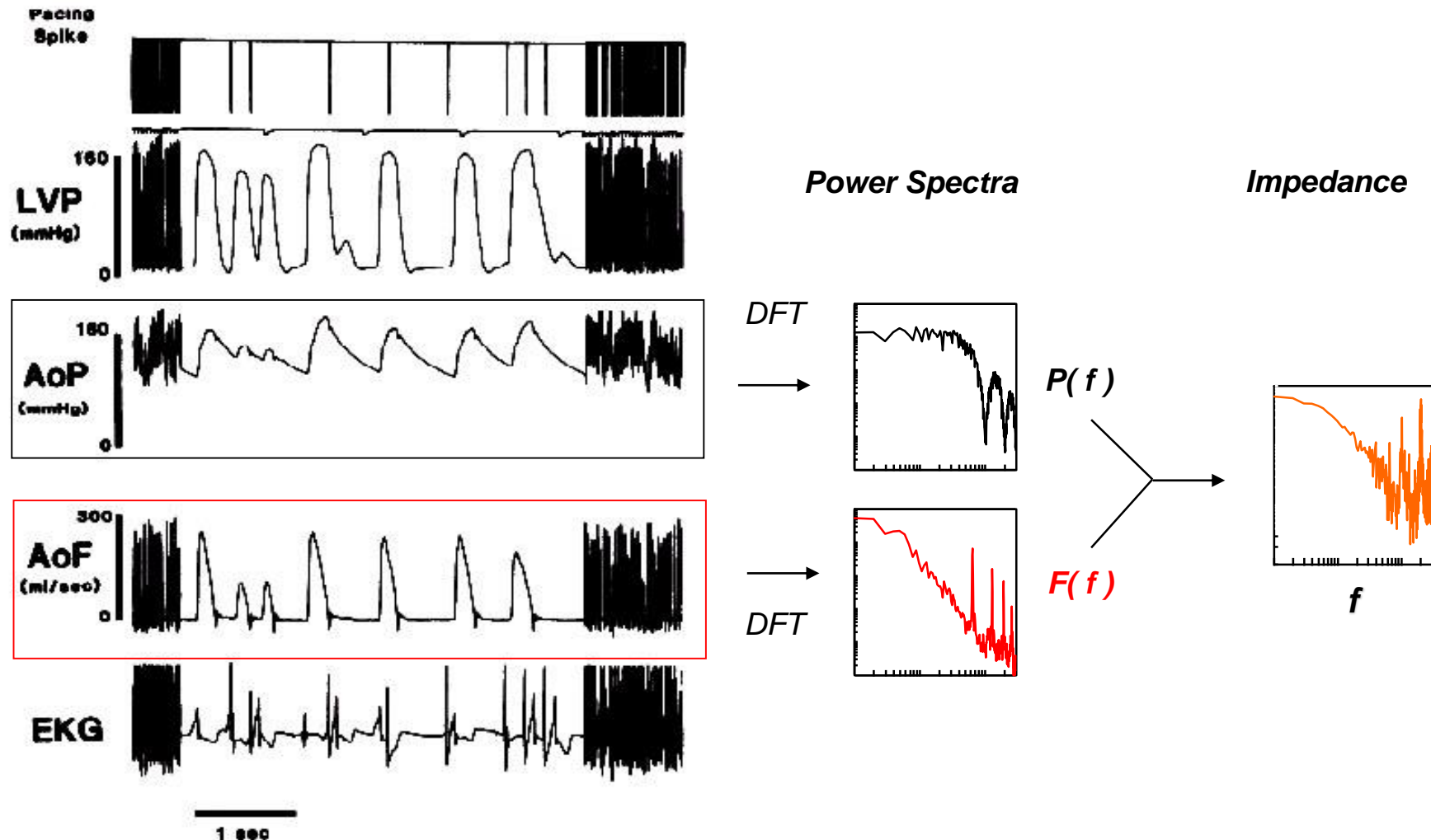
$$Z_{in}(f) = \frac{P_{Ao}(f)}{Q_{Ao}(f)}$$

- 瞬時血圧波形と血流波形は一致しない
- 血管の動的な特性を考慮する必然性

- 心臓は拍動的に駆出しているため、負荷の性質は抵抗では語り尽くせない

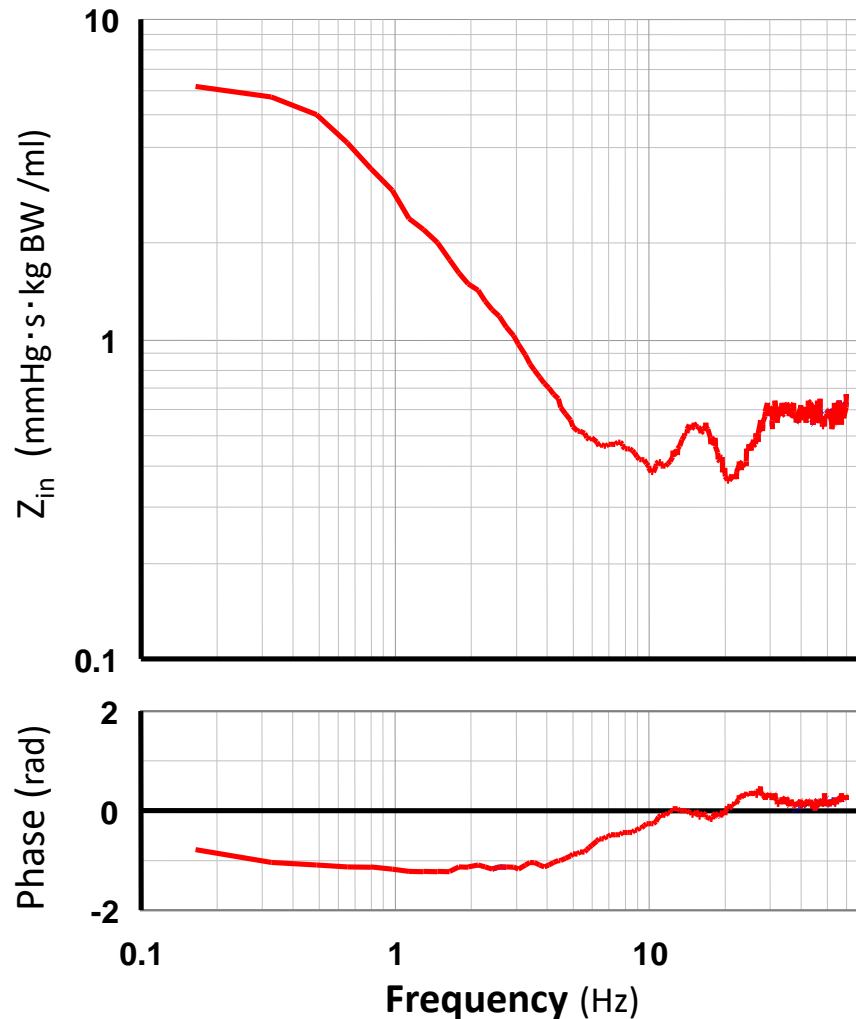
宮下 他: 血圧, 2003 より改変

大動脈入カインピーダンスの測定

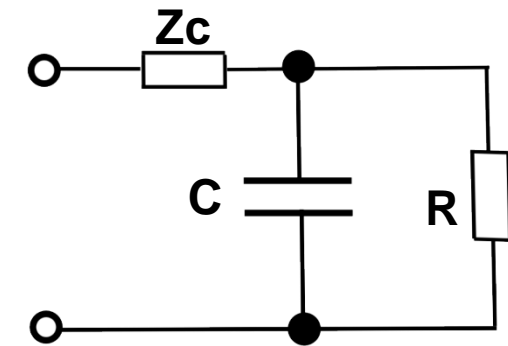


Alexander JJr, Am J Physiol 1989

左室の駆出し難さ：インピーダンス

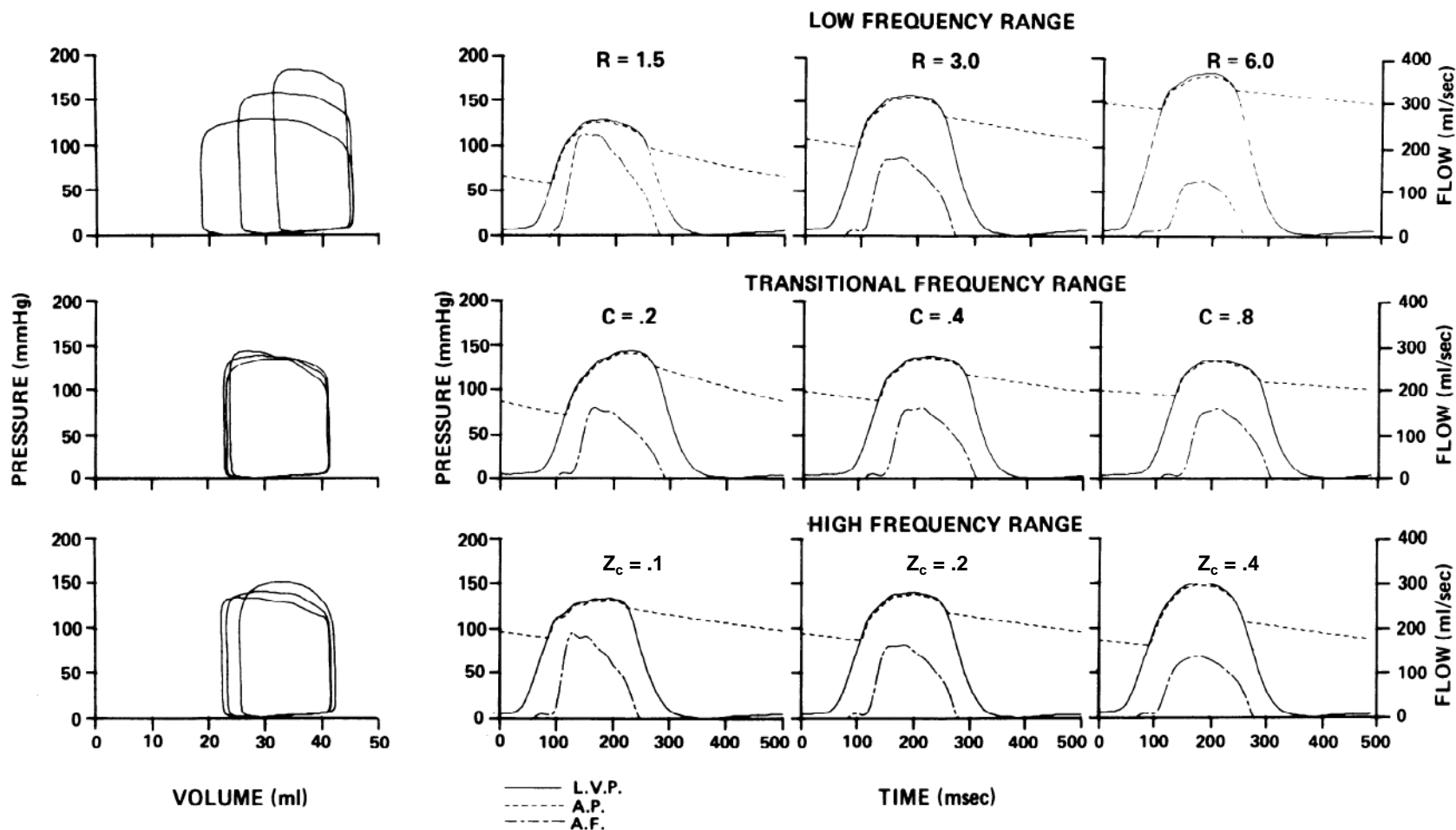


- インピーダンスは低周波数で大きく、高周波数になると急激に低下する
- この周波数依存性から動脈の力学特性のモデル化が出来、抵抗やコンプライアンスの算出が可能



- インピーダンスを用いることで詳細に血管の力学特性をすることができる

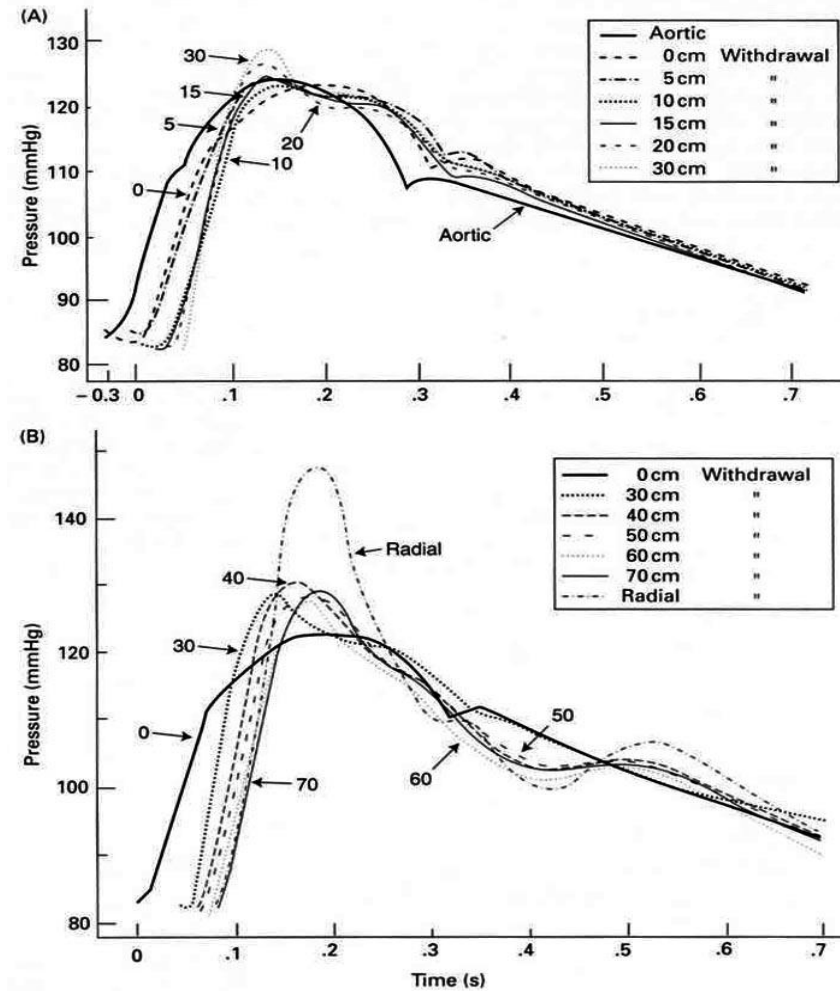
CやZ_cは圧波形を変えるがSVはRで決まる



- Rの変化は大きくSVを変える。
- Cの変化は血圧波形を変えるがSVへの影響は極めて少ない
- Z_cの変化は波形に影響を与えるが、SVへの影響は限定的
- CO曲線がRの影響を強く受けることを示す

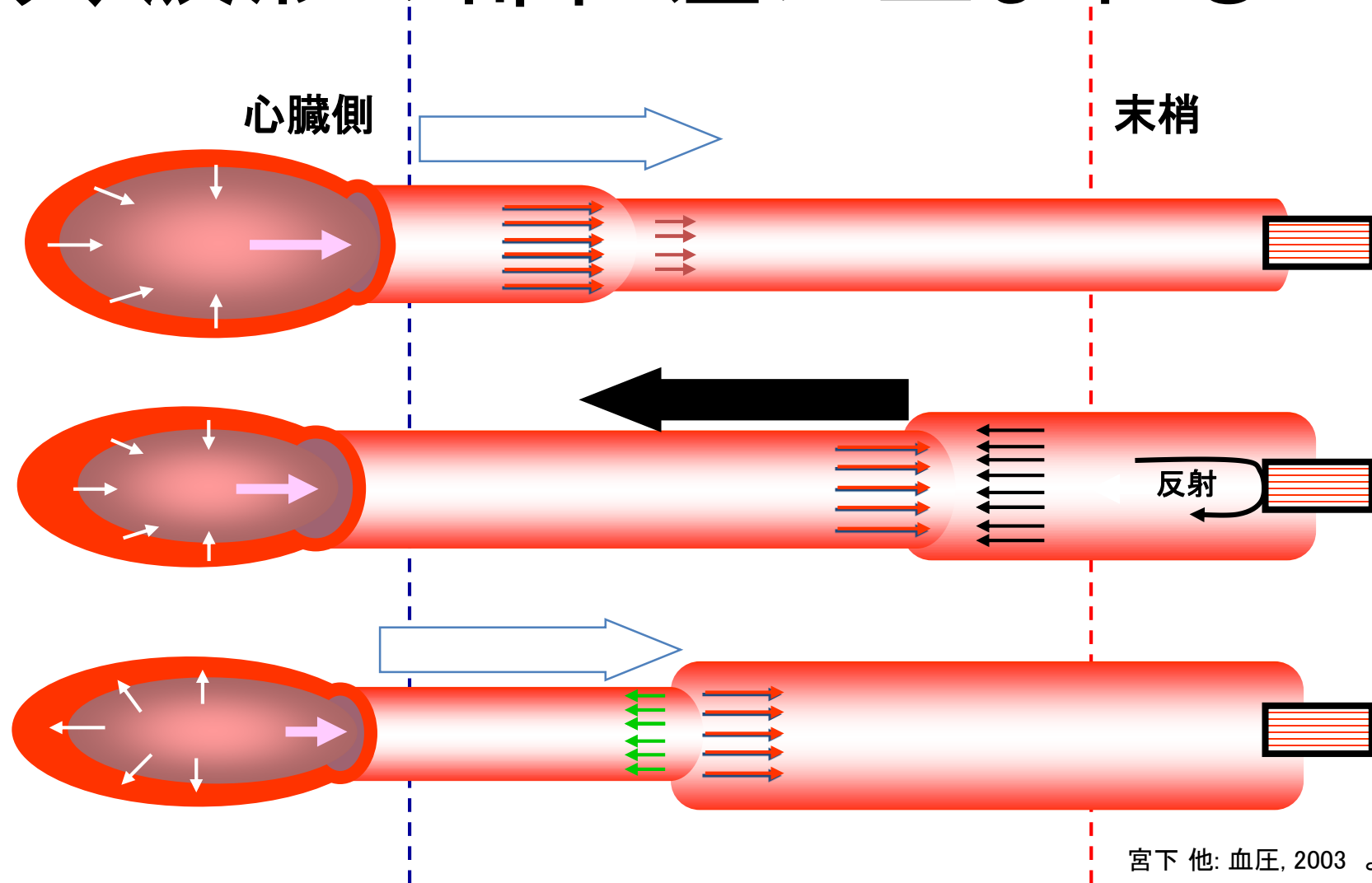
Sunagawa K et al., Am J Physiol 1985

血圧波形は部位により異なる



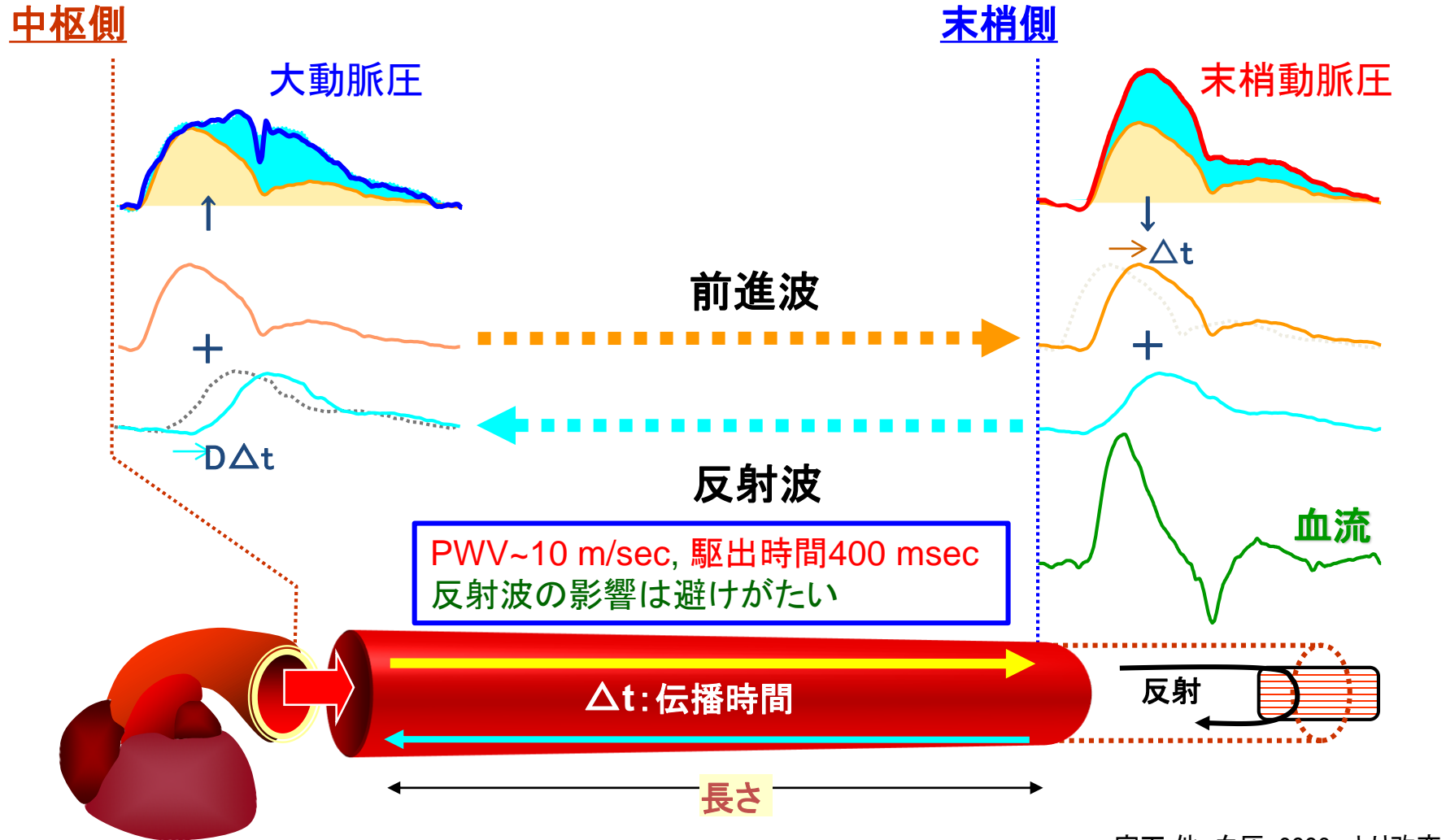
Remington and Wood (1956)

進行波と反射波が重畳する時相が部位で異なり、波形の部位差が生まれる



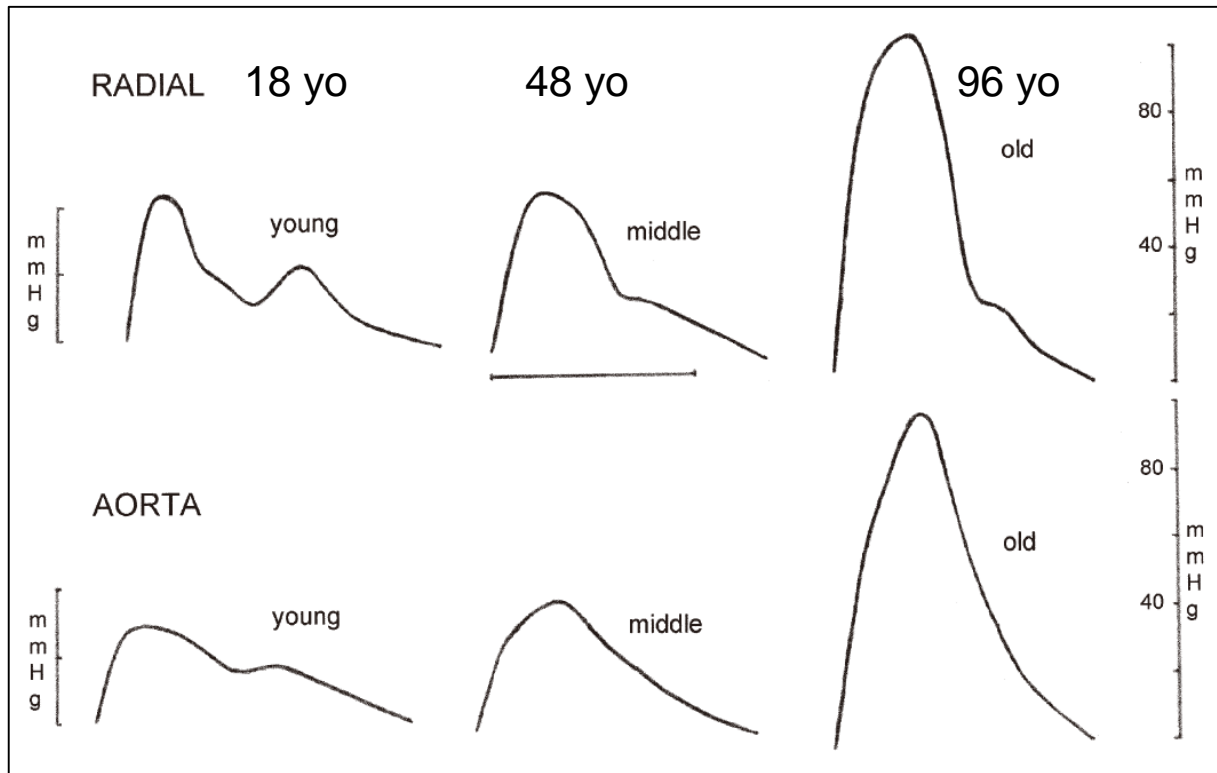
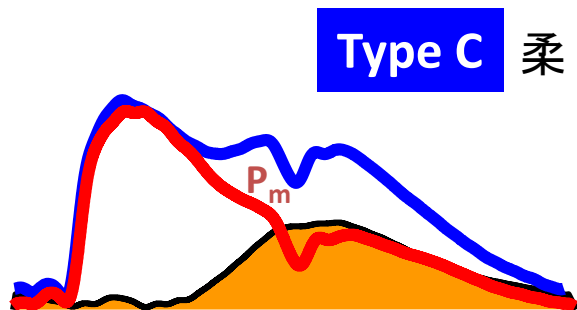
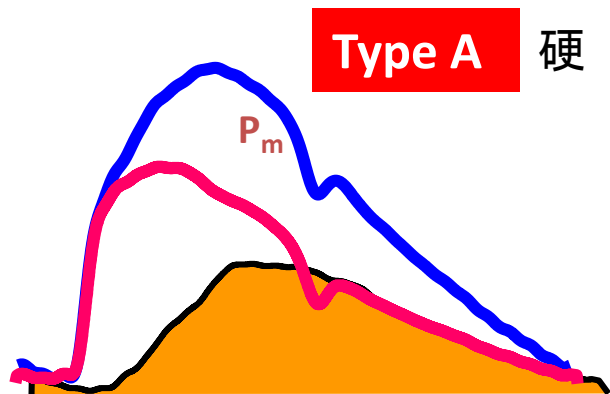
宮下 他: 血圧, 2003 より改変

末梢血圧は中心動脈圧より高い



宮下 他: 血圧, 2003 より改変

波形で分かる硬い動脈と柔らかい動脈



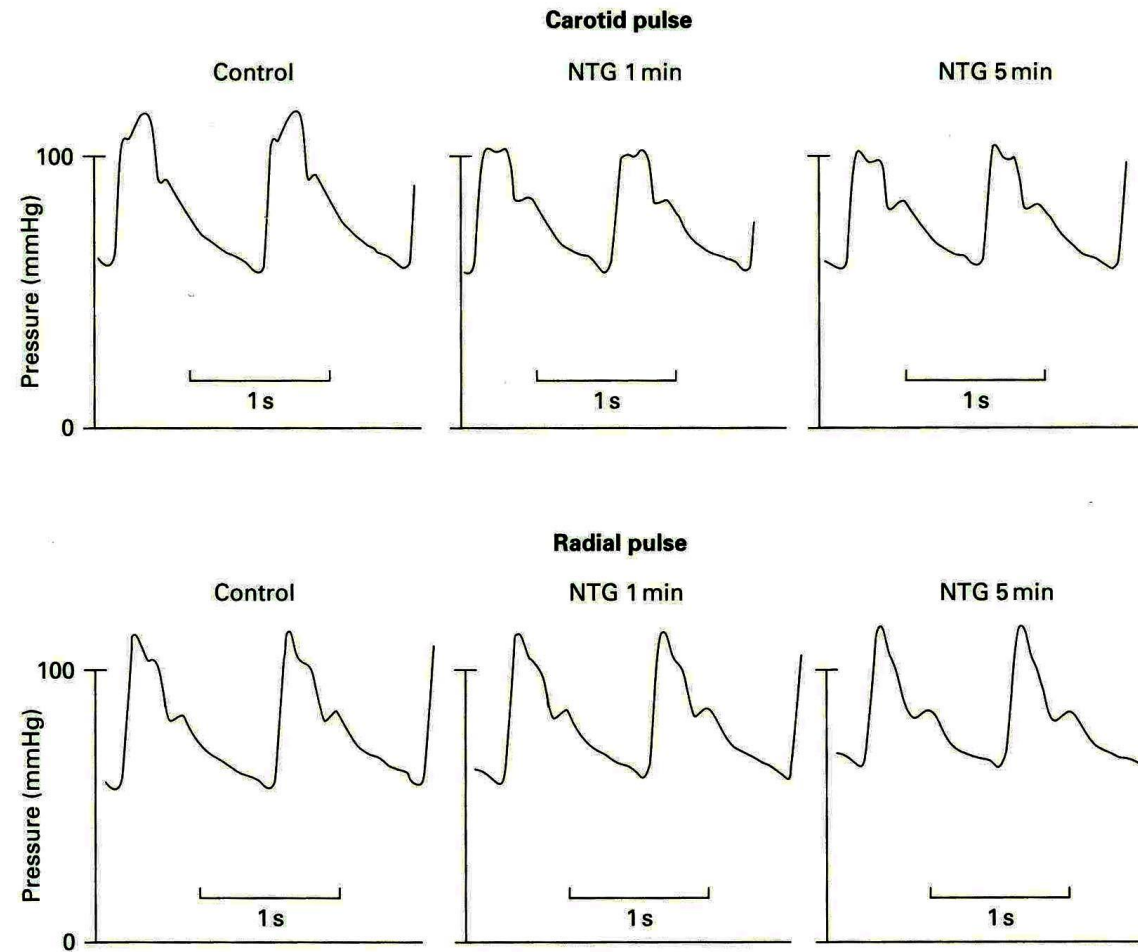
O' Rourke MF and Hashimoto J, JACC 2007

- 前進波 (駆出時間、脈拍、伝搬速度)
- 反射波 (反射率、伝搬速度、体格)

宮下 他: 血圧, 2003 より改変



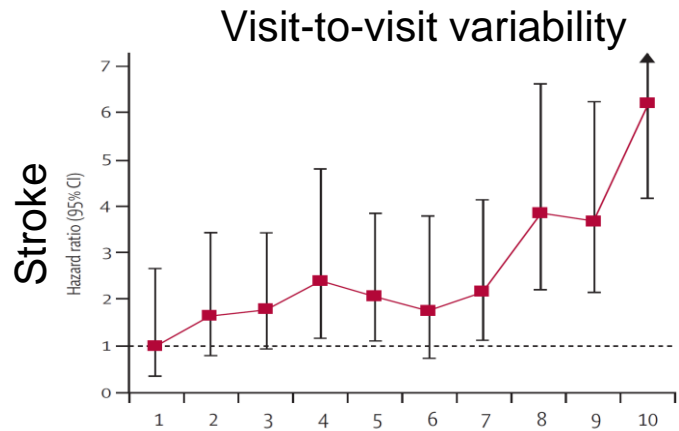
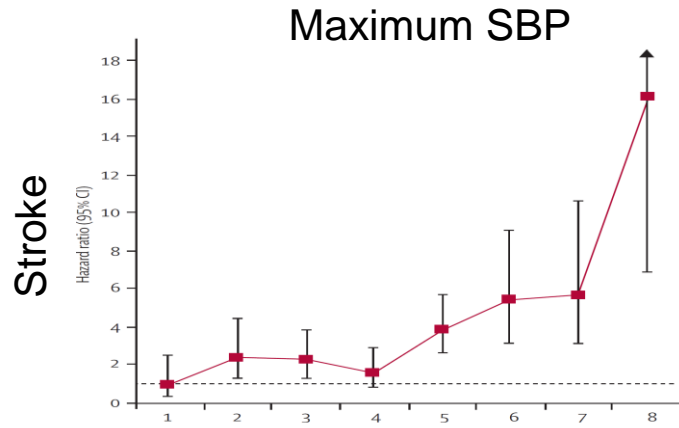
NTGでは中心動脈圧だけが変化



血管が分かる

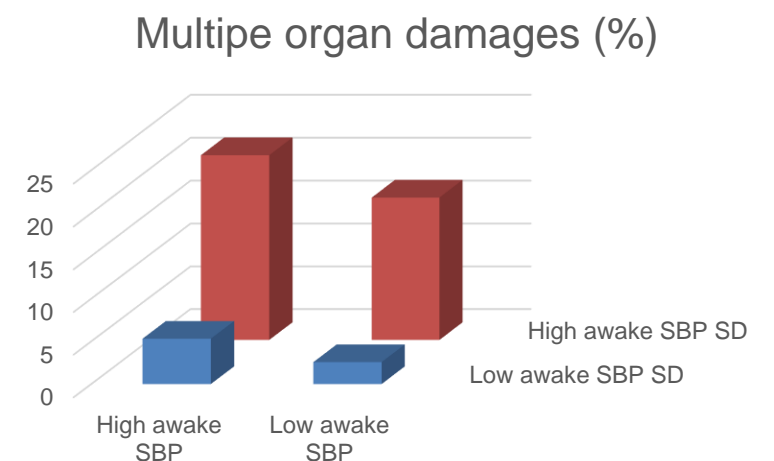
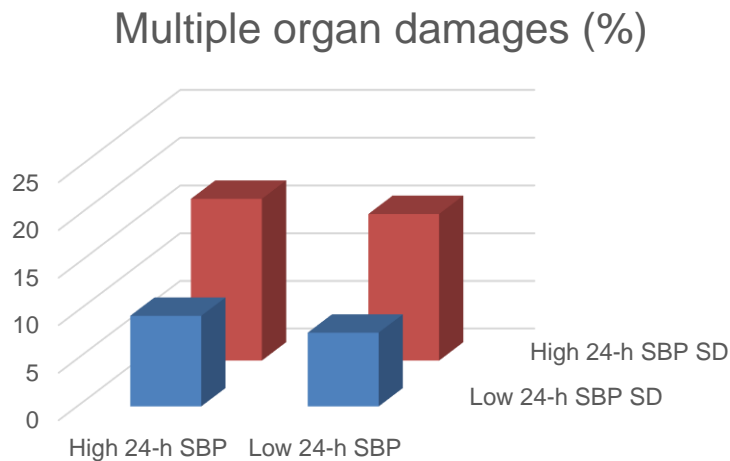
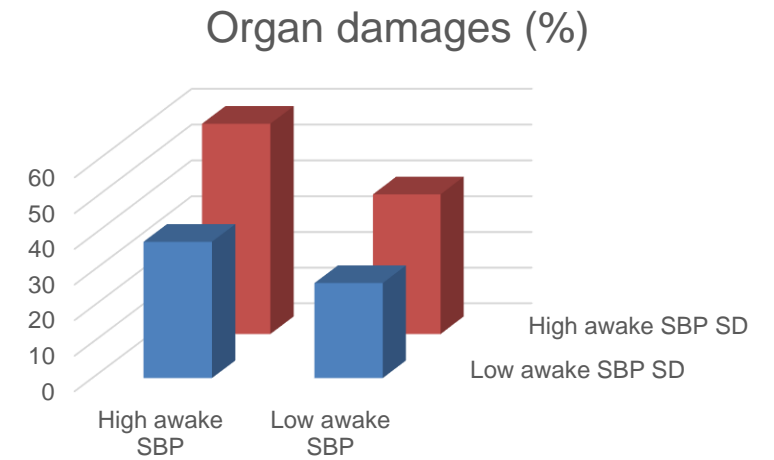
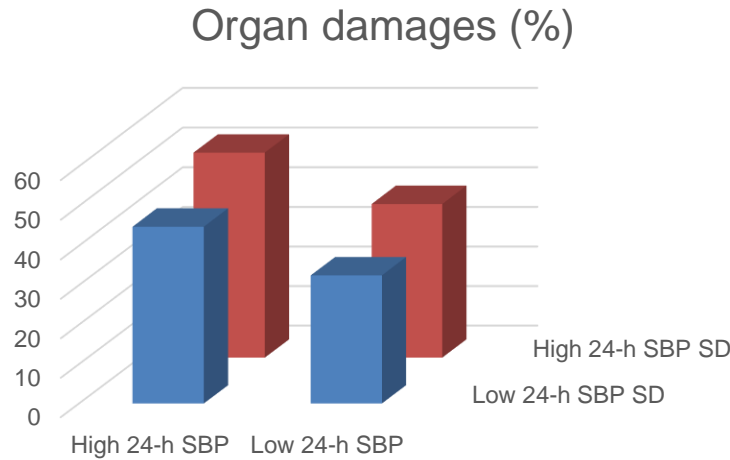
Fig. 8.25 Pressure waves recorded indirectly from the carotid artery (top) and radial artery (bottom) of a 50-year-old normotensive man under control conditions (left), and 1.0 minute (center) and 5.0 minutes (right) after sublingual administration of 0.3 mg nitroglycerin (NTG). Reproduced from O'Rourke *et al.* (1989a)

血圧変動はイベント発症の危険因子



Substudy of UK-TIA (longitudinal, 1979-85, n=2006 post TIA patients, every 4 months)

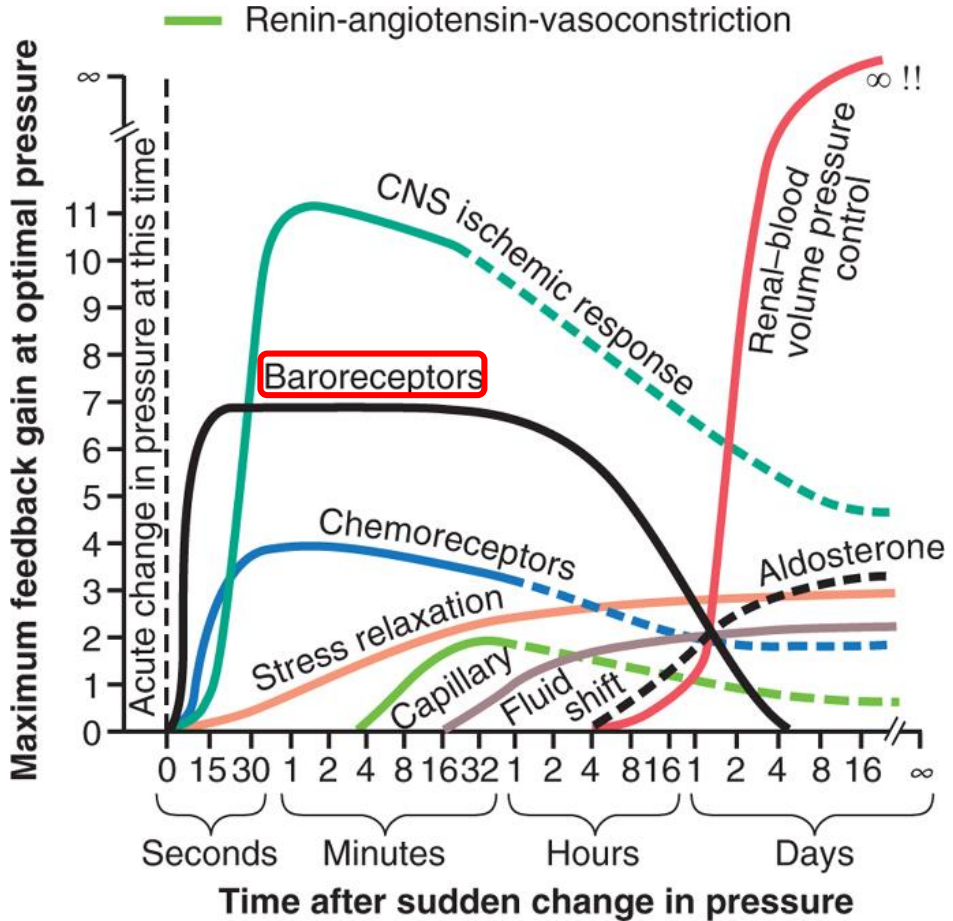
Rothwell PM et. al, Lancet 2010



Cross sectional study. 169 HT patients. Organ damages are evaluated by microalbuminuria, GFR, LVH, and IMT of the carotid artery.

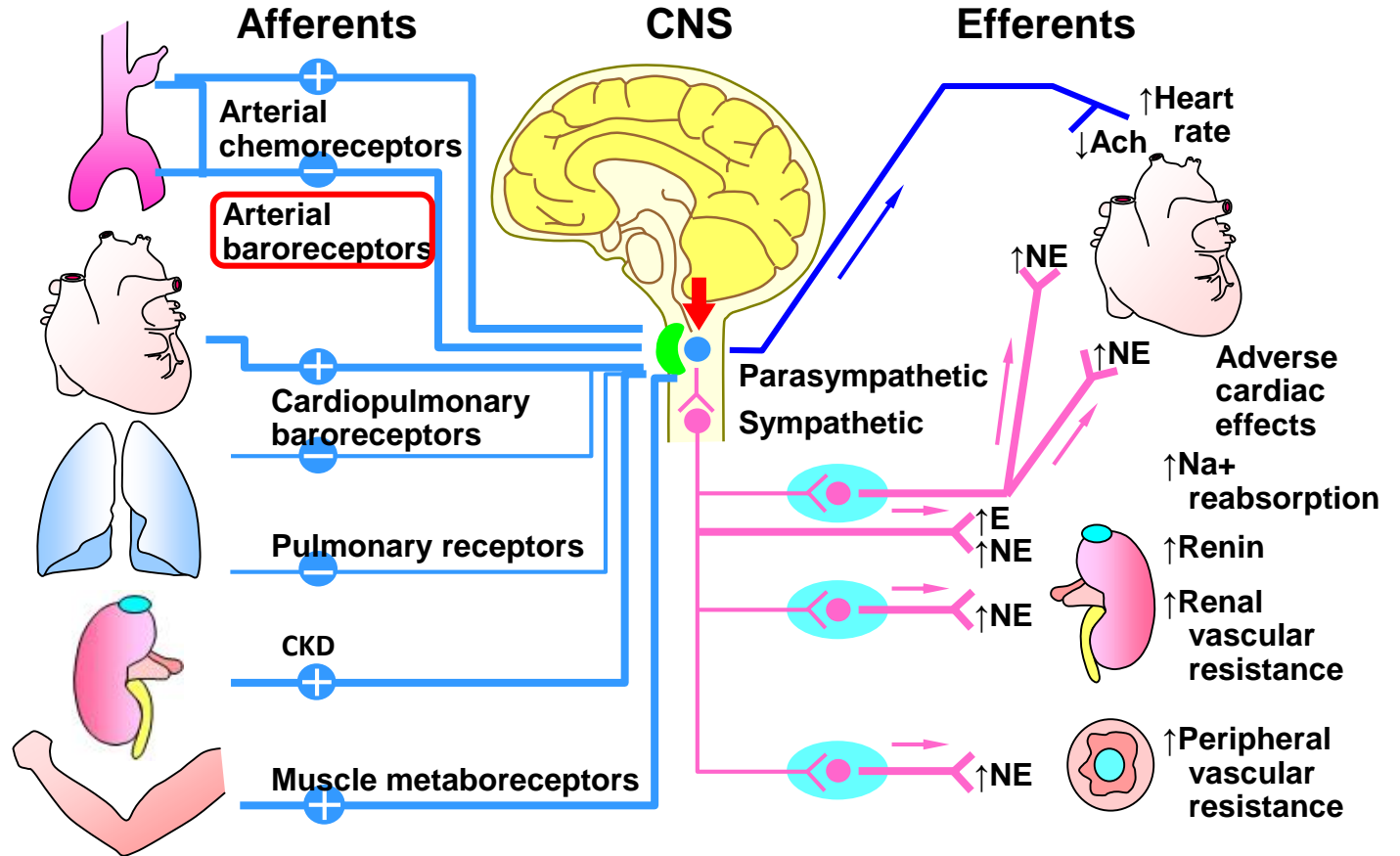
Leoncini G et al., J Human Hypertension 2013

血圧安定化に関わる仕組み



Hall: Guyton and Hall Textbook of Medical Physiology, 12th Edition
Copyright © 2011 by Saunders, an imprint of Elsevier, Inc. All rights reserved.

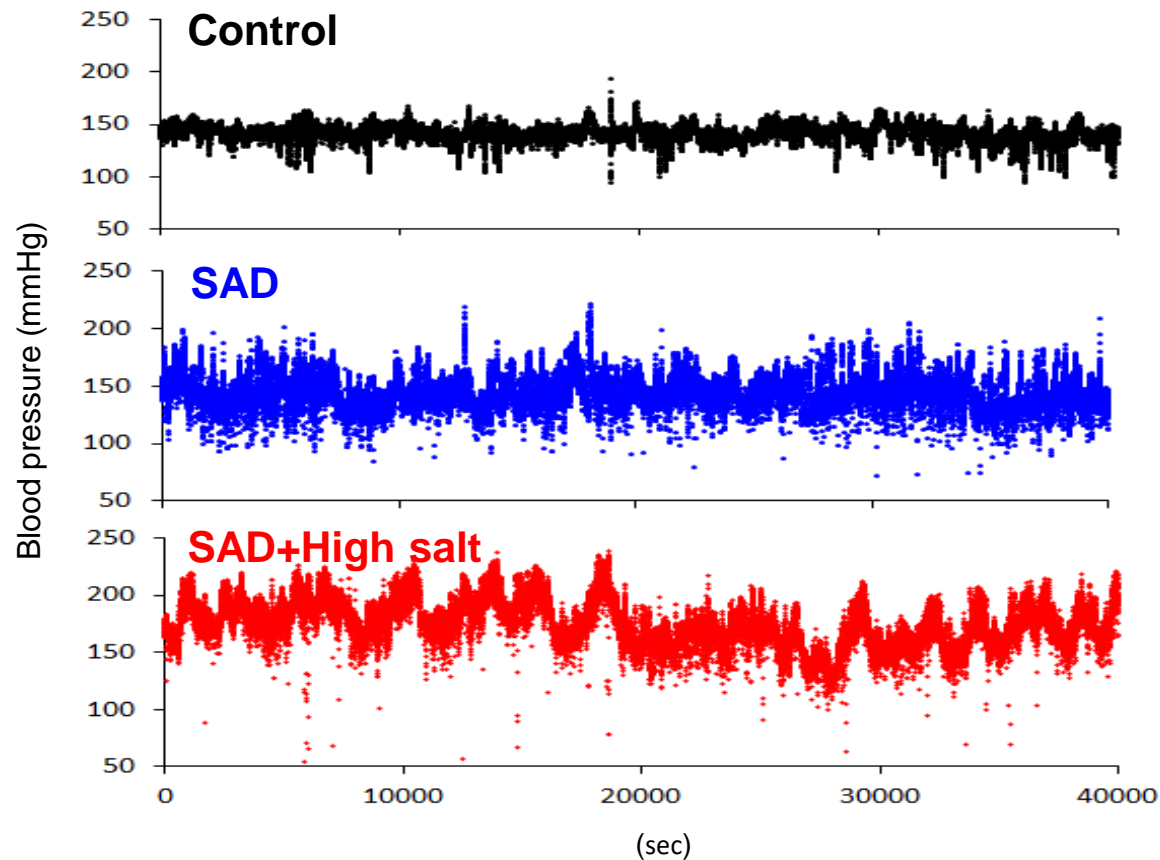
Guyton's Textbook of Medical Physiology, 2011



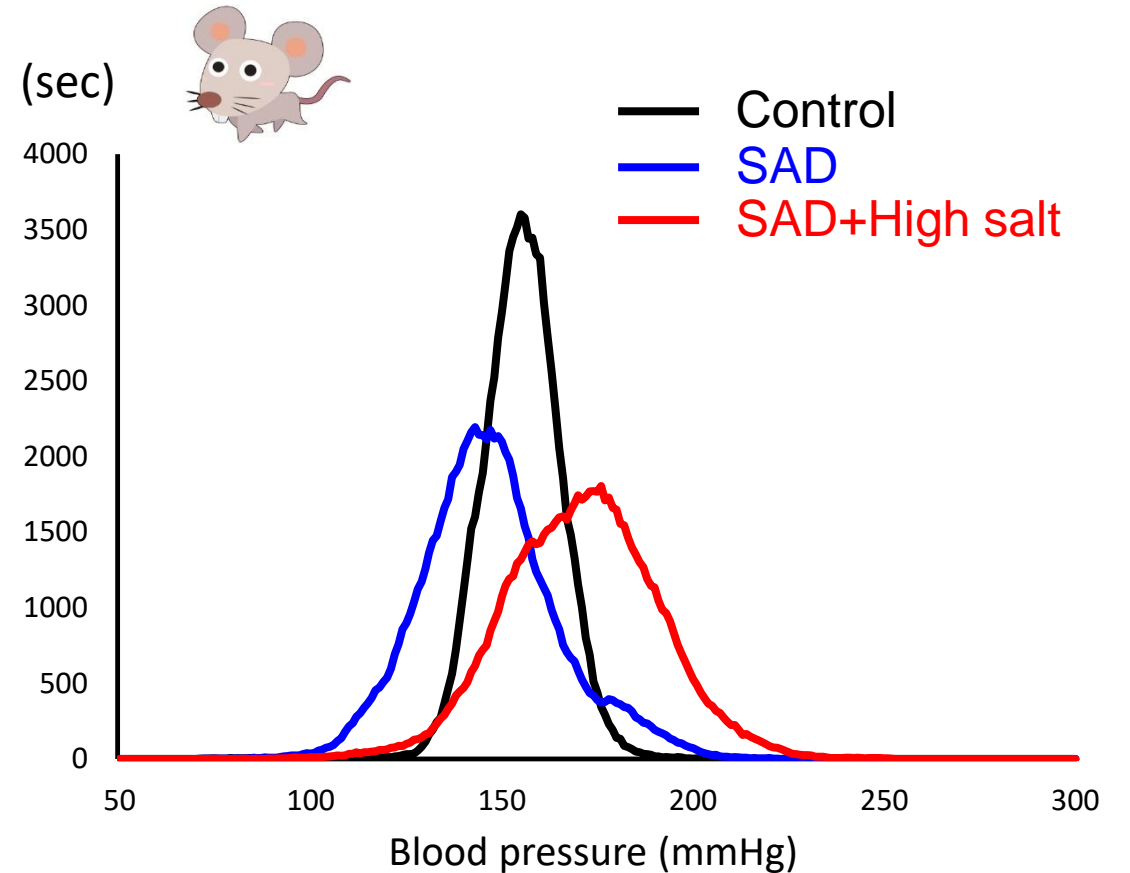
Floras JS, JACC, 2009 (一部改編)

圧反射不全は血圧変動を増加させる

血圧の時系列



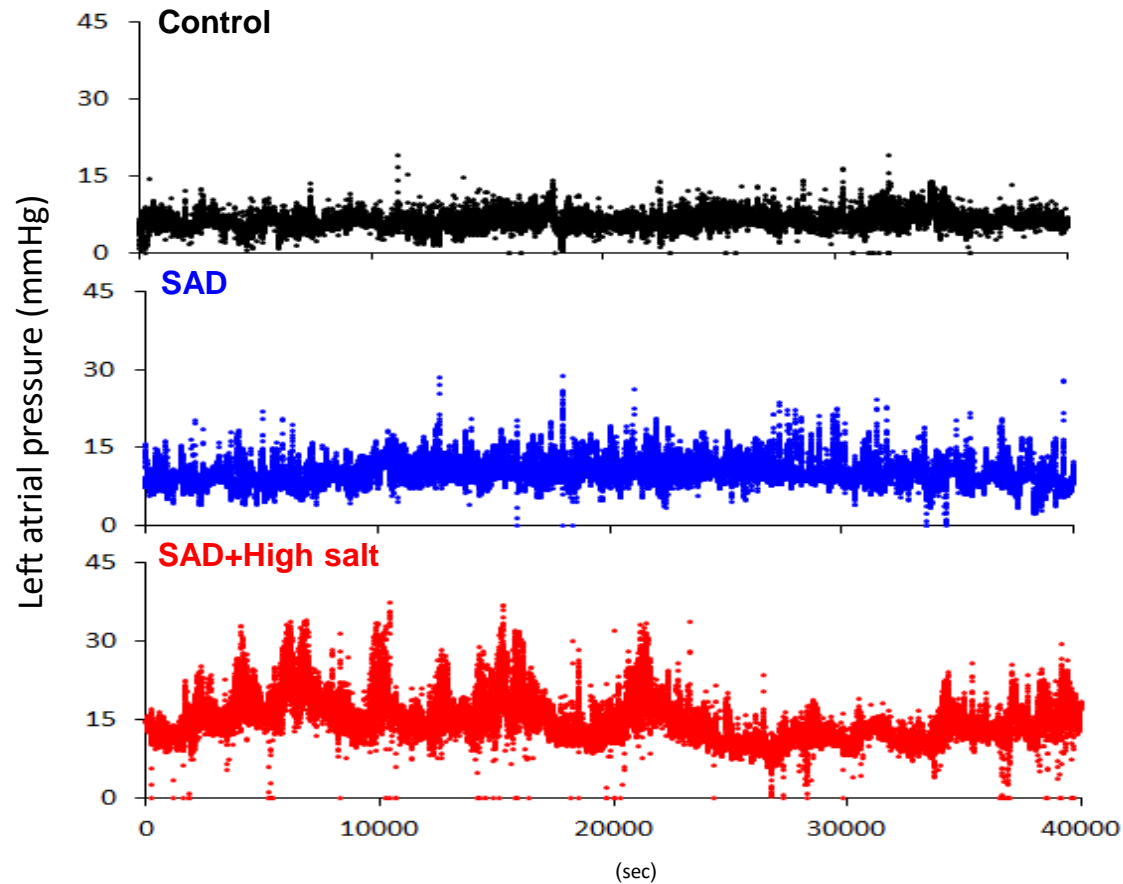
ヒストグラム



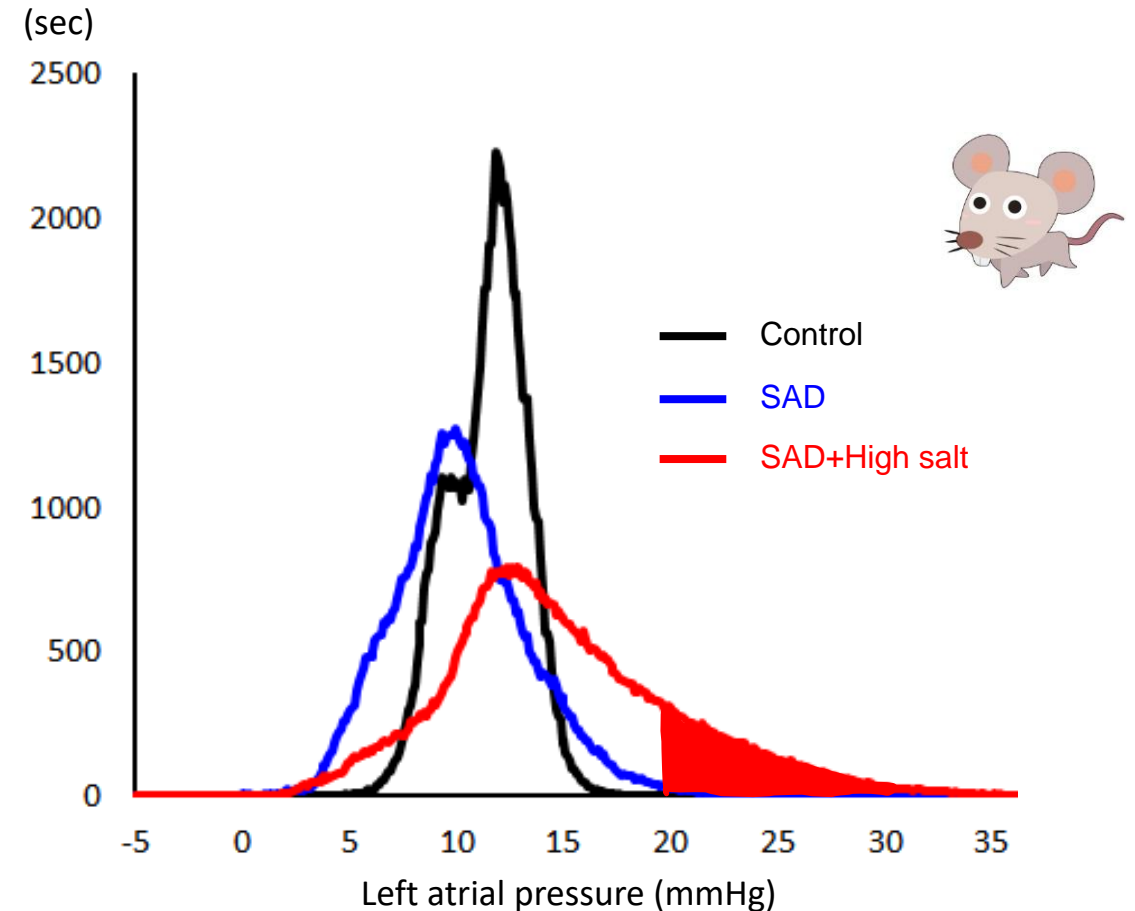
Sakamoto K et al. Am J Physiol 2016

圧反射不全は左房圧を極端に上げる

左房圧の時系列

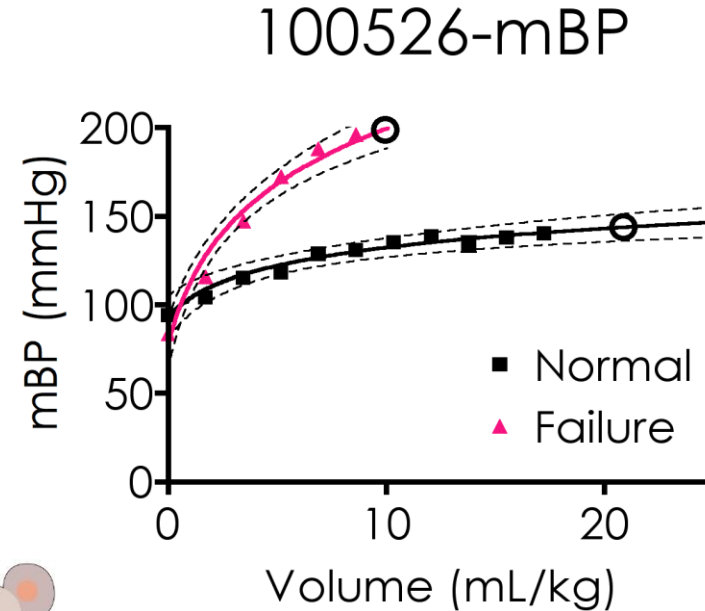
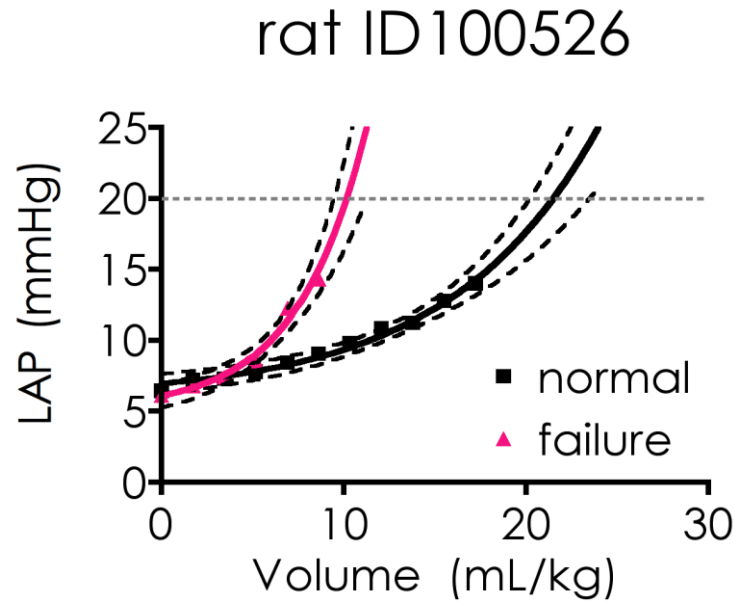


ヒストグラム



Sakamoto K et al. Am J Physiol 2016

圧反射不全は肺水腫の危険因子



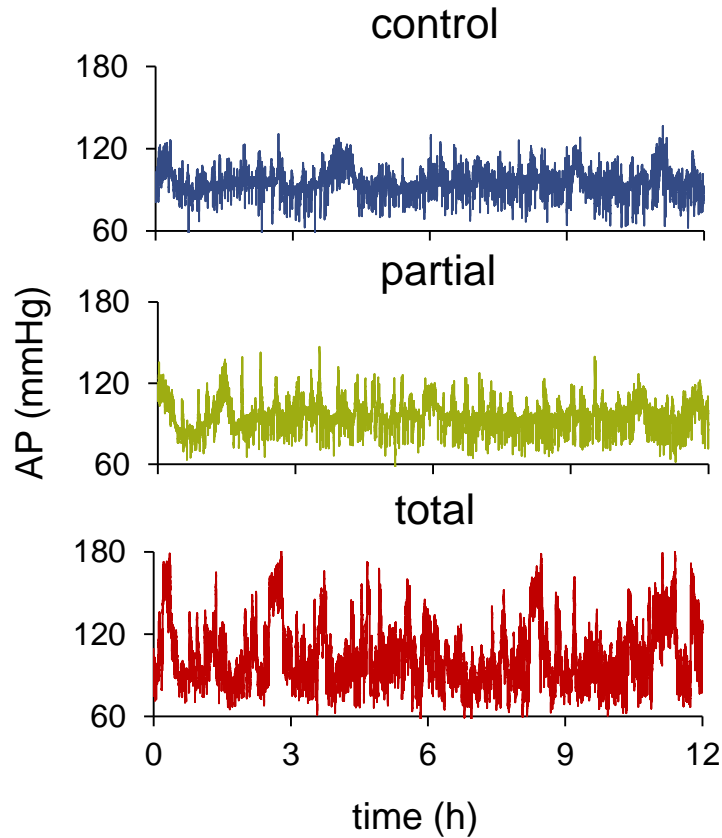
Funakoshi K et al. J Card Fail 2014



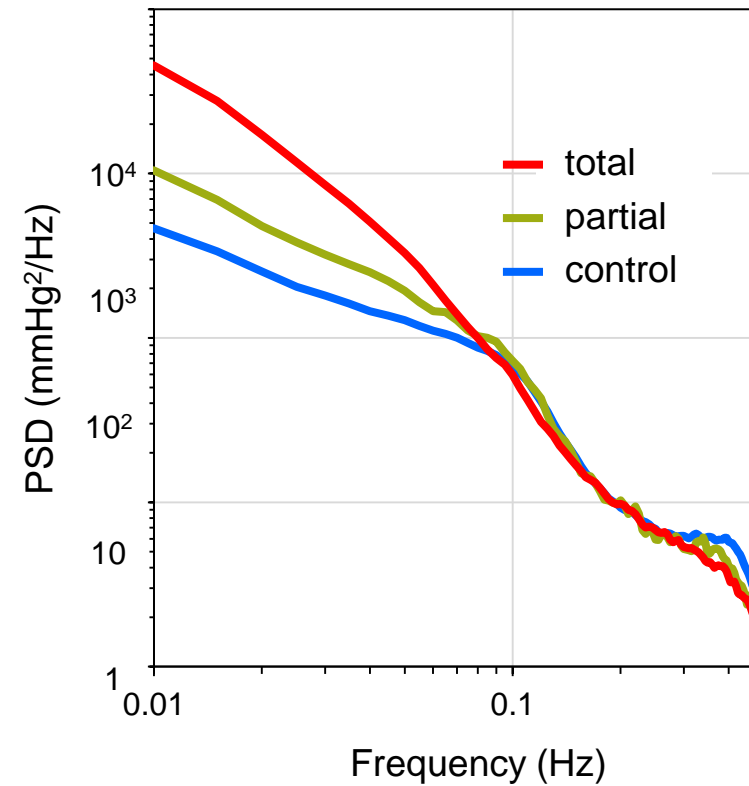
血圧変動評価は高血圧や心不全のリスク層別化に重要。変動評価の具体的な戦略は？

瞬時連続血圧記録から圧反射機能の推定

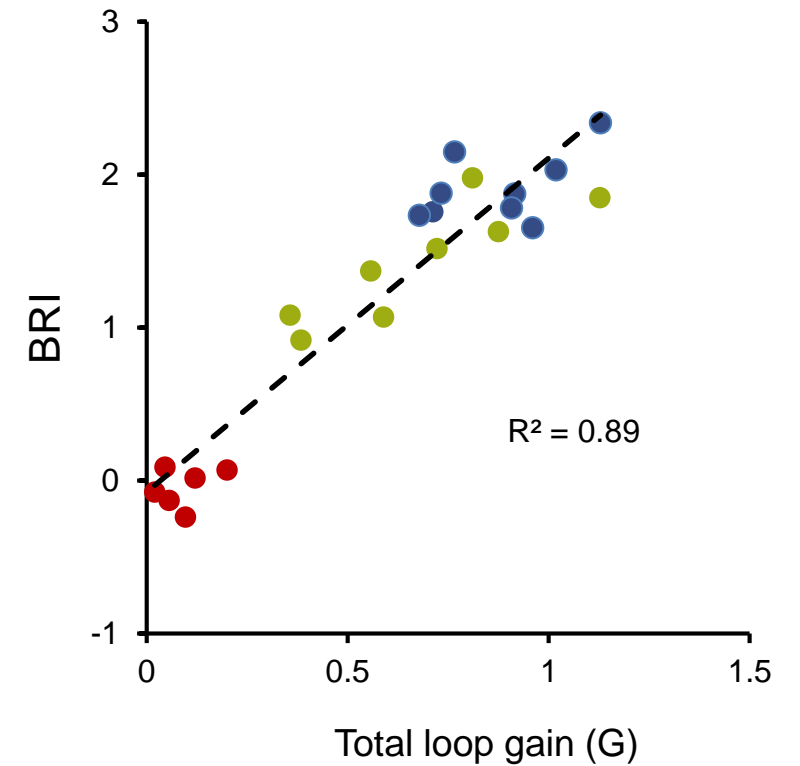
連続瞬時血圧



PSD

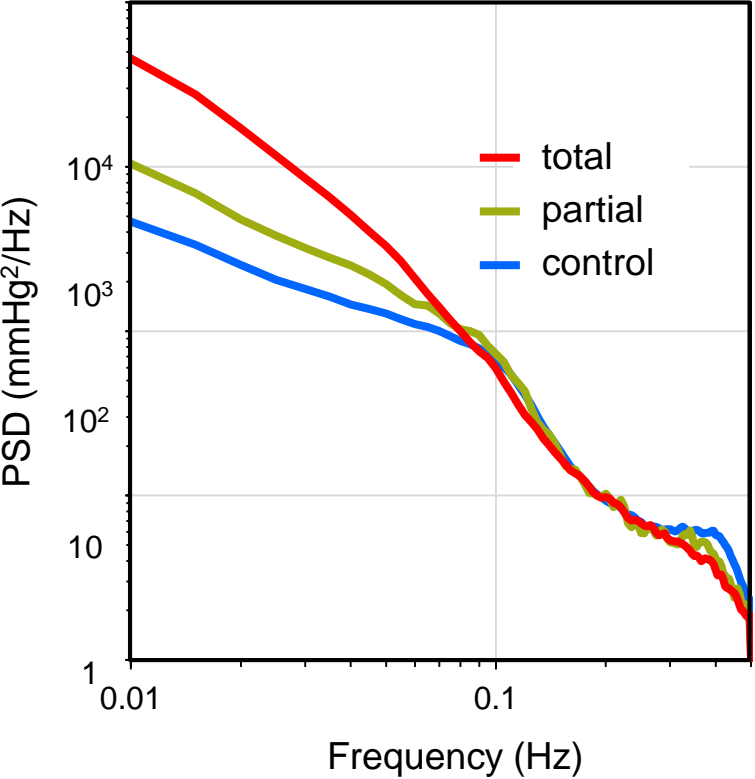


圧反射開ループゲイン



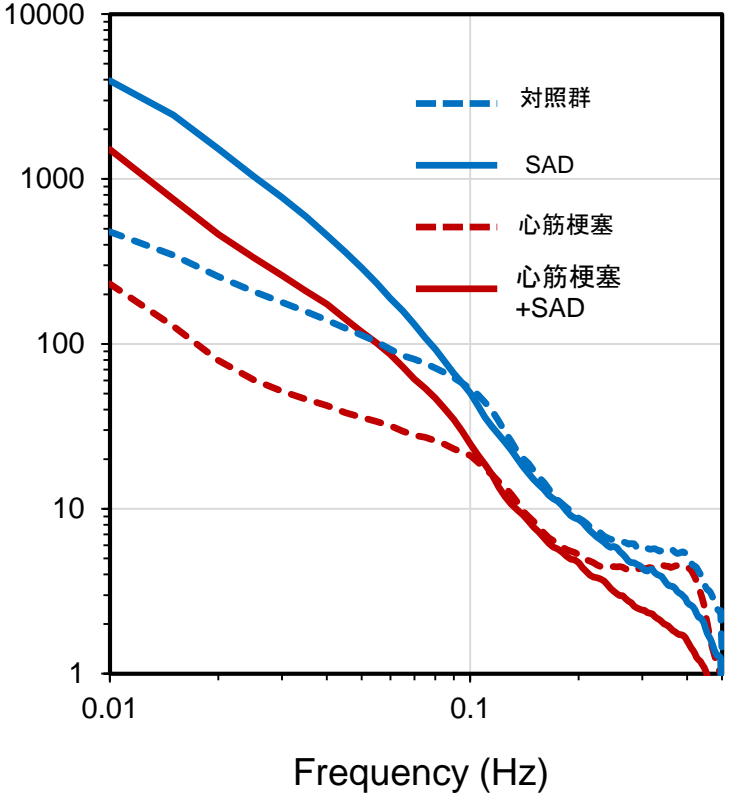
最近の展開

圧反射の機能評価



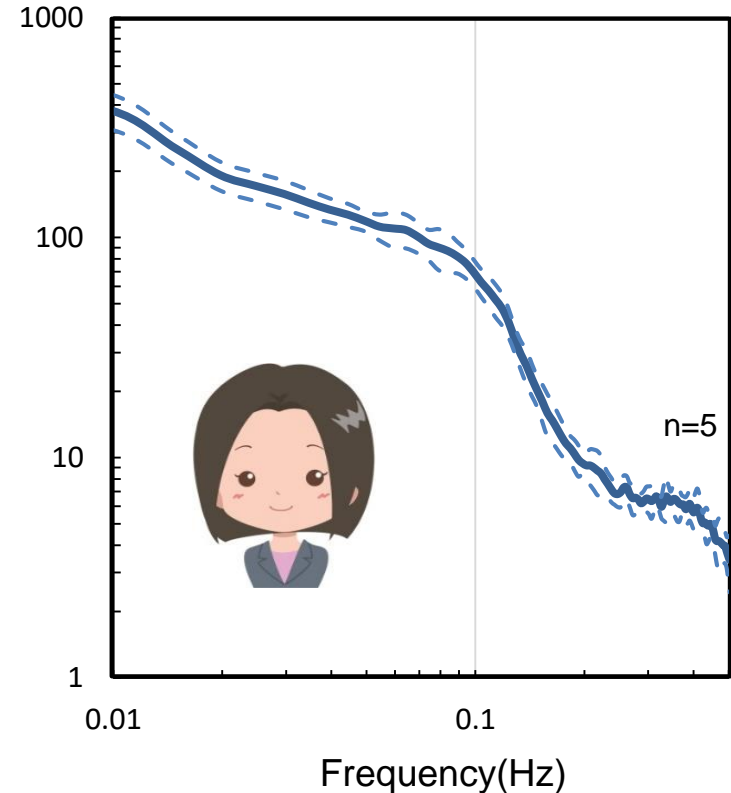
Mannoji H et al., Am J Physiol 2019

心機能の評価






Mannoji et al., EB2017

ヒトへの応用



本日のまとめ

1. 血圧=血管内圧-大気圧
2. $AP=R \times CO$ 。需要が増えるとRが下がりCOは増加する。RとCOが逆に動くのでAPの変化は少ない
-  3. 圧容積関係と循環平衡を理解することで、**血圧を通して見える宇宙が飛躍的に広がる**
-  4. 反射波を意識するだけで、**瞬時圧波形の理解が劇的に深まる**
-  5. 血圧変動は制御系の破綻を意味し、イベントの危険因子になる。瞬時**連続血圧**のPSDから圧反射機能や心機能の推定が可能(**連続血圧記録の重要性**)
6. 血圧記録の簡便さはBigData+AIの社会実装を加速し、その利活用はDXの中で青天井

$$AP=R \times CO$$

血圧は心の鏡、
命の鏡



賢二

ご清聴有り難うございました

Imagine beyond
unimaginable

