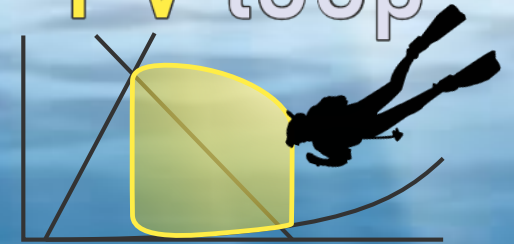


Deep dive into
PV loop



心臓は硬さが変わる袋？ 心臓の収縮性

坂本 隆史（九州大学病院 循環器内科）

S研究室への配属日

あなたは今日から**S研究室**に所属する心筋研究者です。

あなた

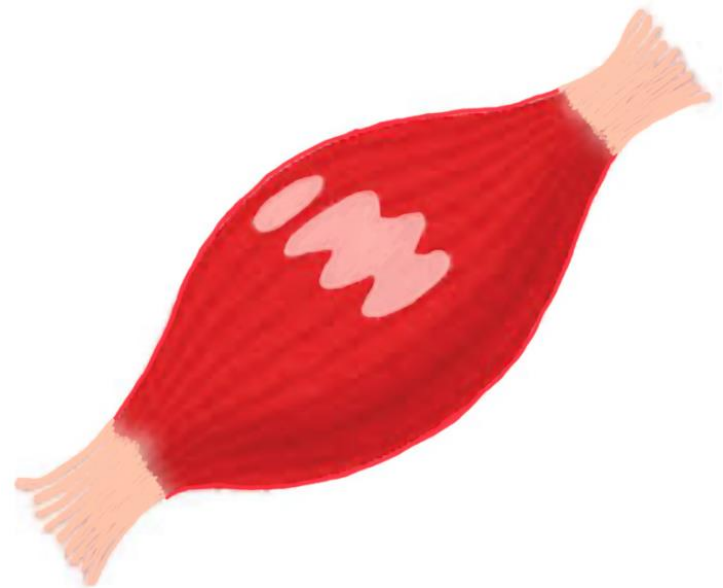
「今日からよろしくお願いします！」

S教授

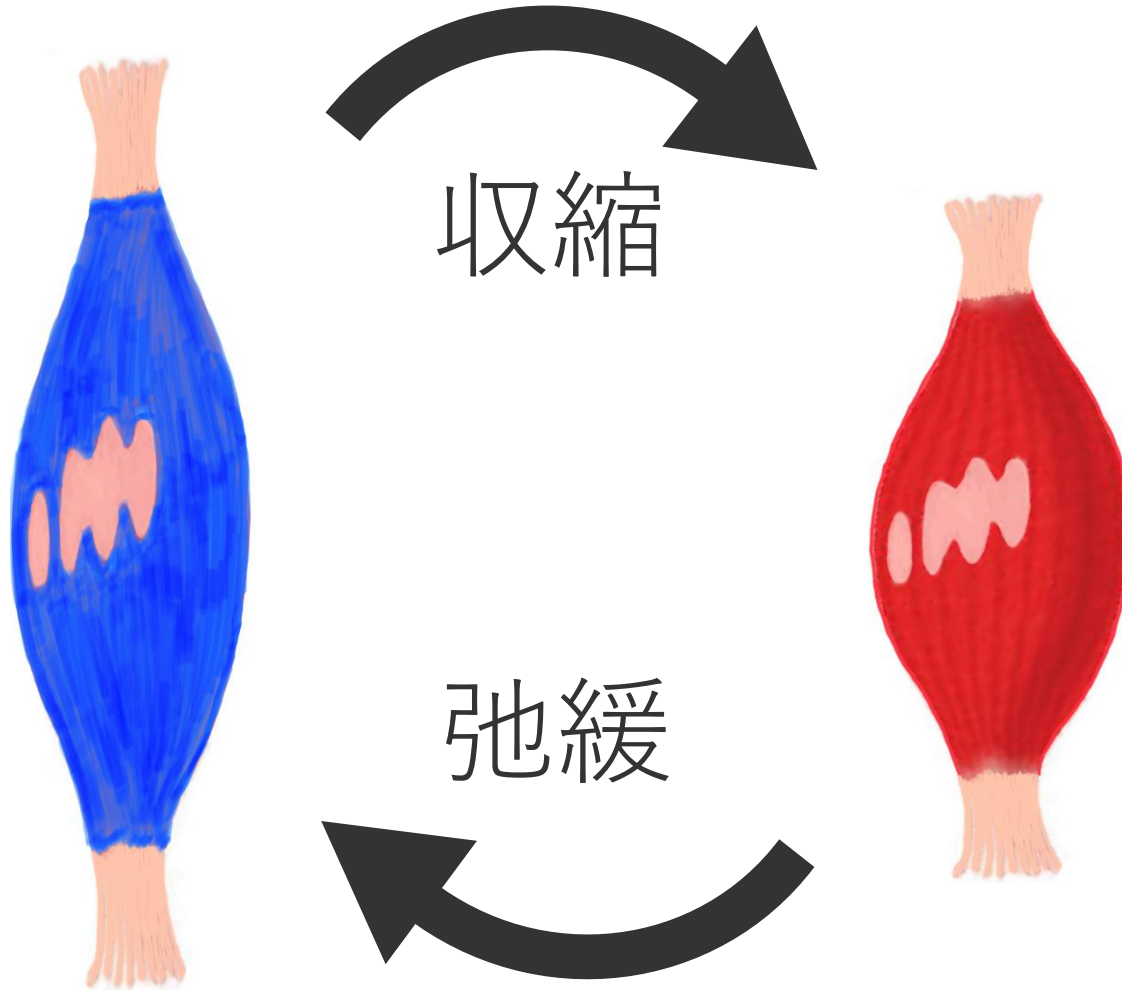
「まずは**心筋の収縮性**を測ってみましようか。」

あなた

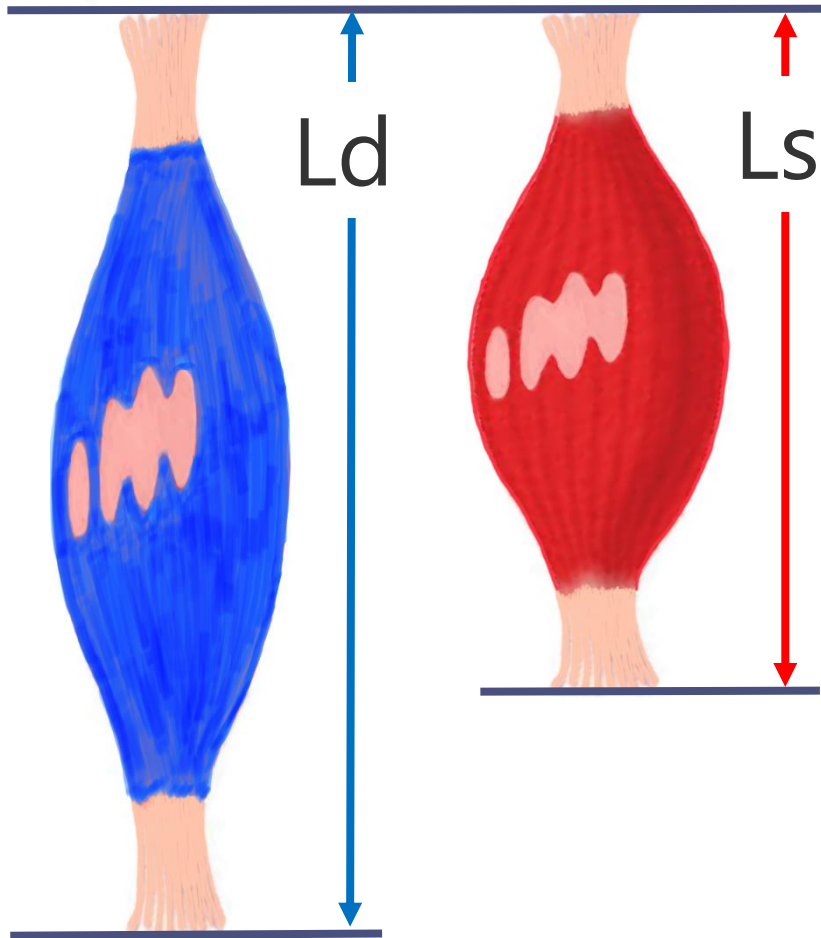
「分かりました！」



心筋の収縮と弛緩



心筋の収縮能の測り方① 長さの変化

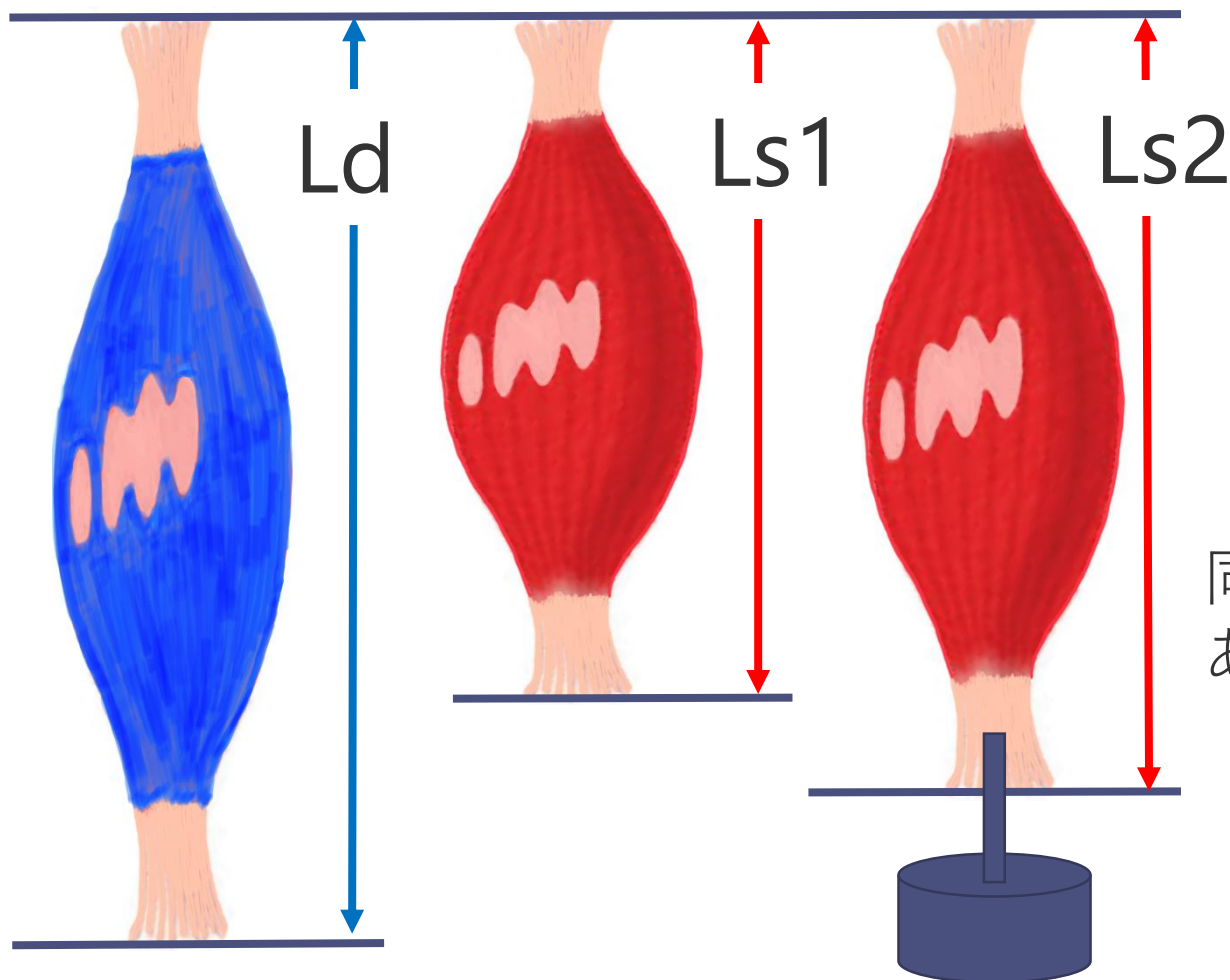


短縮率

Fractional shortening : FS

$$FS = \frac{L_d - L_s}{L_d}$$

心筋の収縮能の測り方① 長さの変化



$$FS1 > FS2$$

同じ心筋なのに重りがあると短縮率は変わる

S研究室のカンファレンス

あなた

「心筋は収縮すると縮むので長さの変化を見てみました。でも、**重りをつけると短縮率(FS)は小さくなりました。**」

S教授

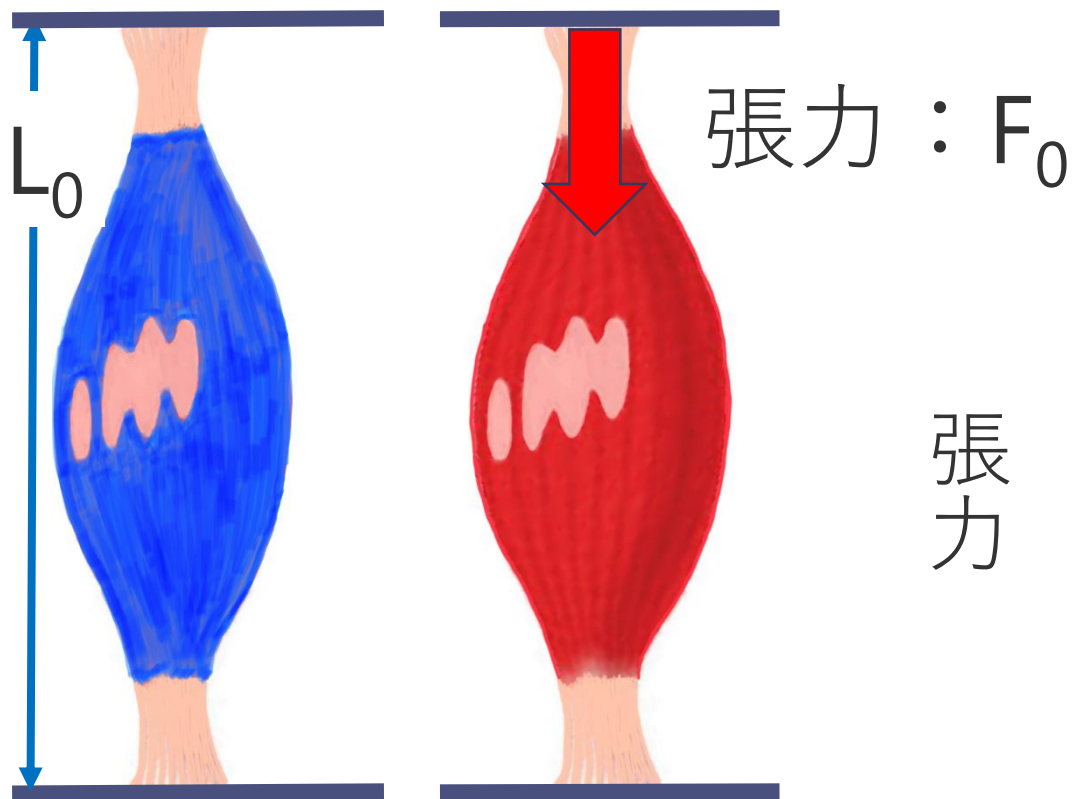
「重りのような**後負荷で変わる指標**ではなく、
負荷に関係ない指標（**負荷非依存の指標**）があればいいですね。」

「心筋は収縮するときに**張力**を発生するので、測ってみたらどうですか？」

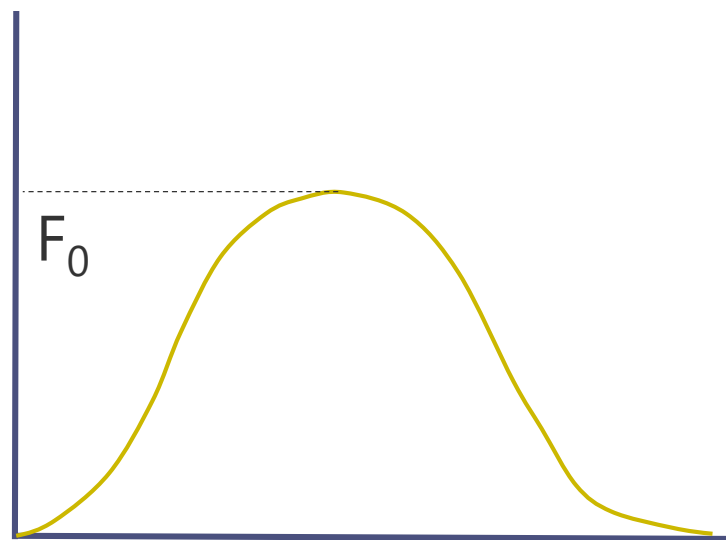
あなた

「分かりました。測ってみます。」

心筋の収縮能の測り方② 張力の変化

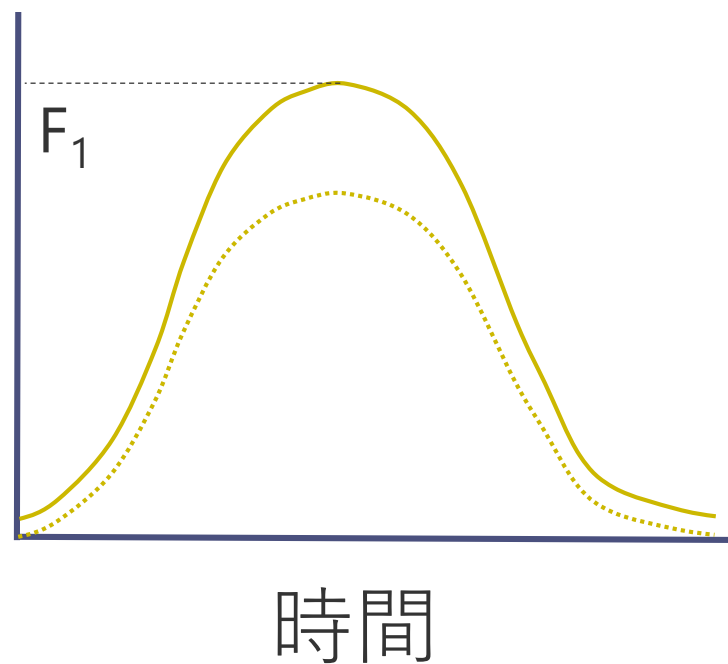
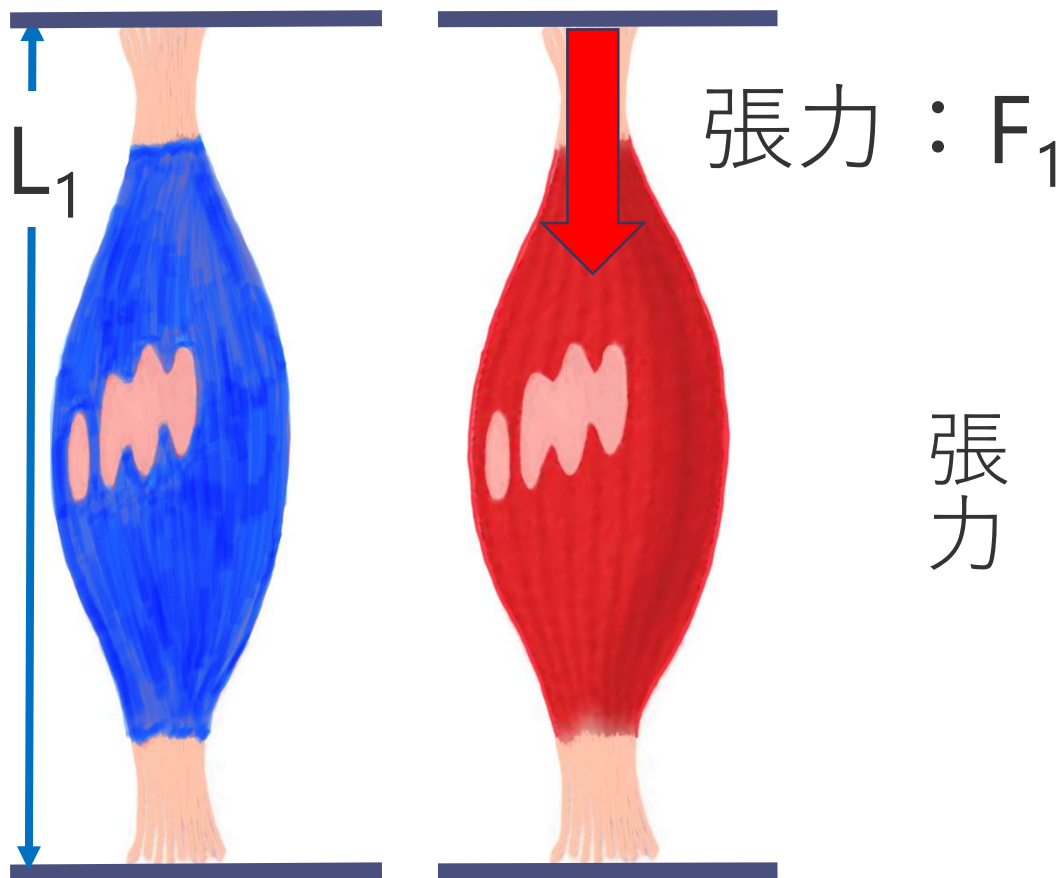


張力

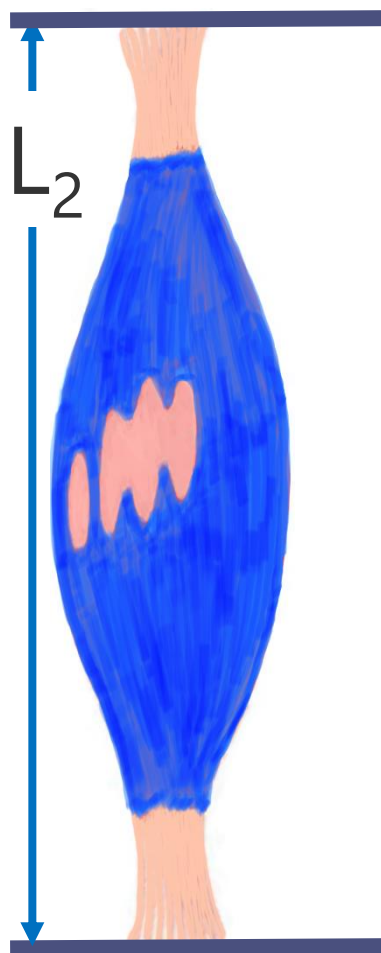


時間

心筋の収縮能の測り方② 張力の変化

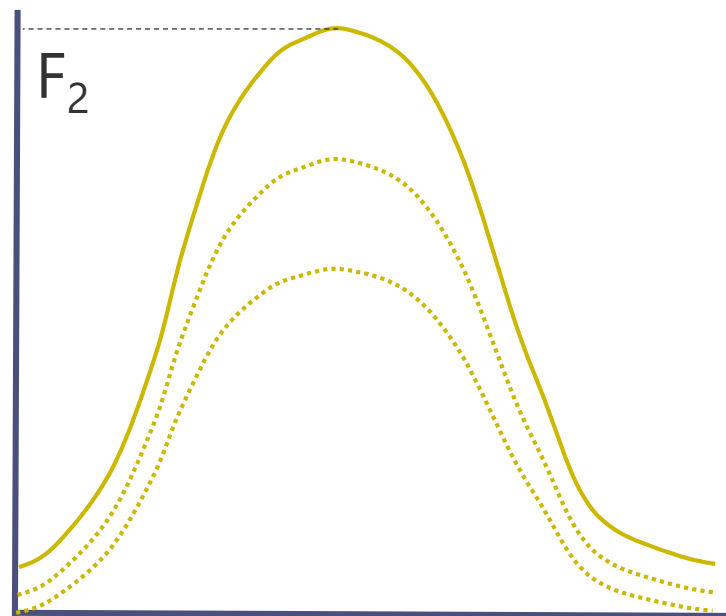


心筋の収縮能の測り方② 張力の変化



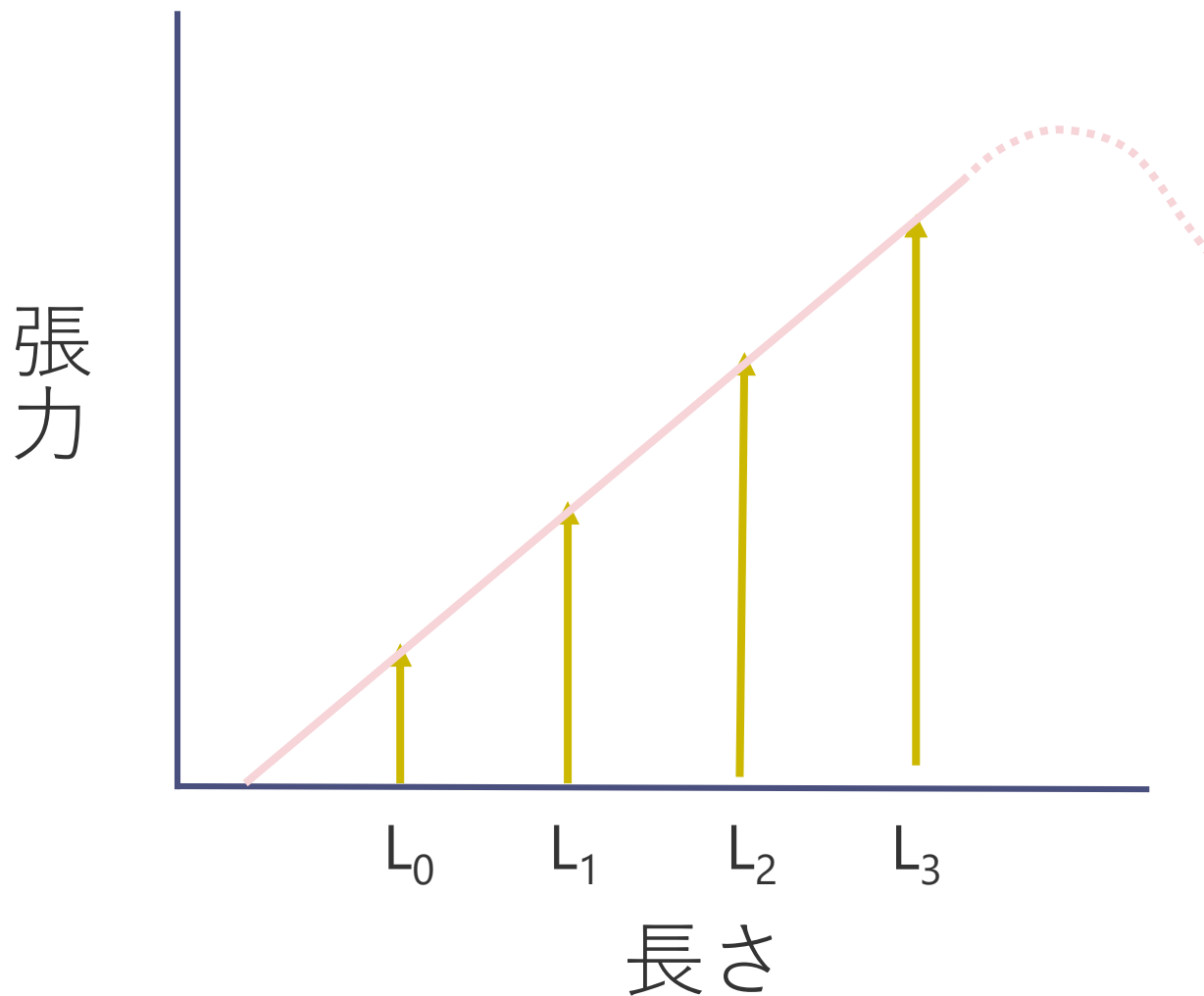
張力： F_2

張力

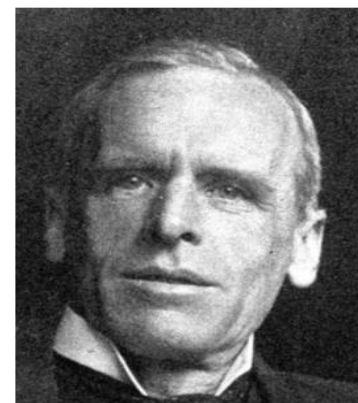


時間

心筋の収縮能の測り方② 張力の変化

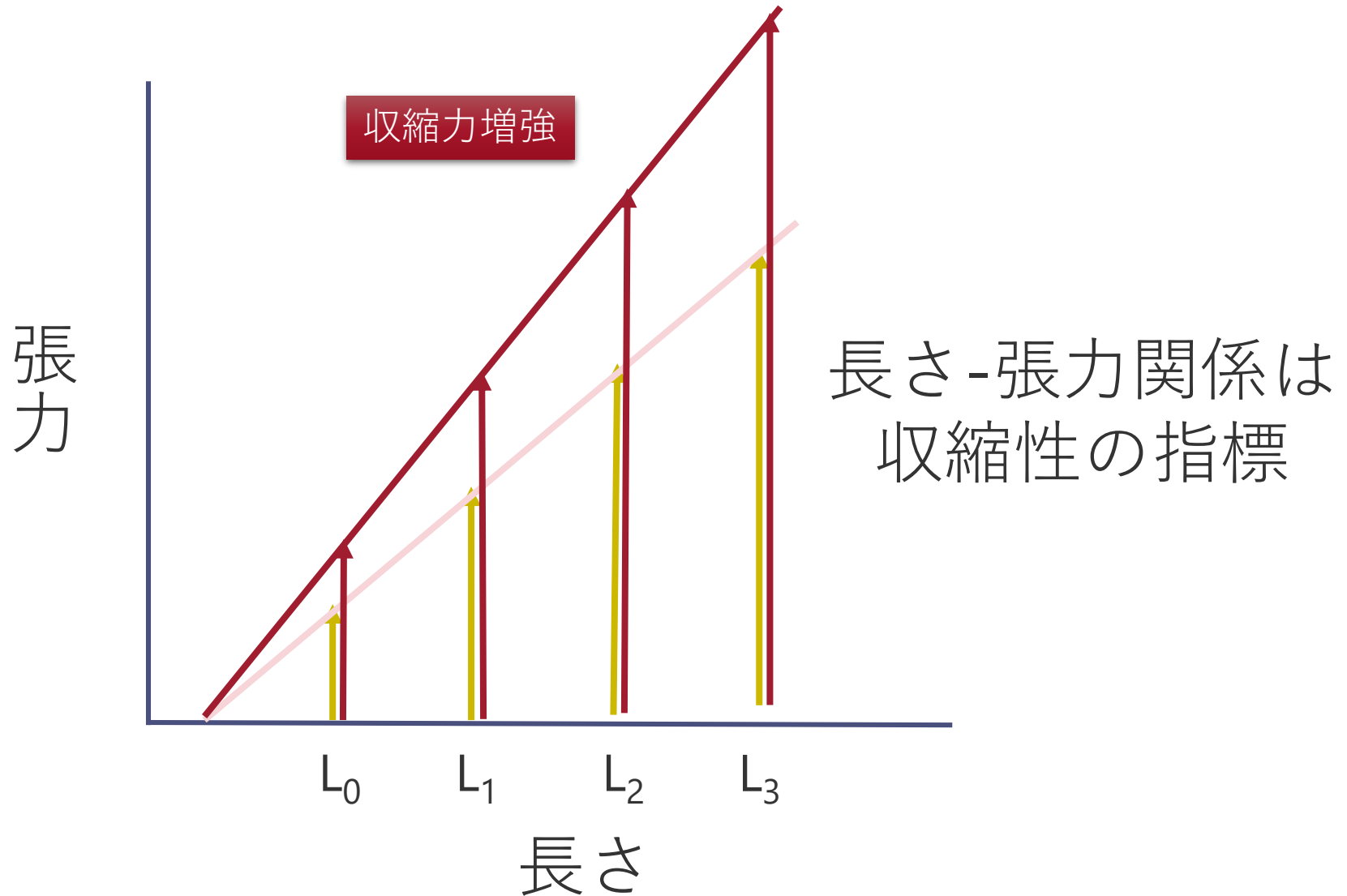


Frank



Starling

心筋の収縮能の測り方② 張力の変化



S研究室のカンファレンス

あなた

「**心筋長と張力の関係**は**心筋固有の収縮力**を示していそうです。」

S教授

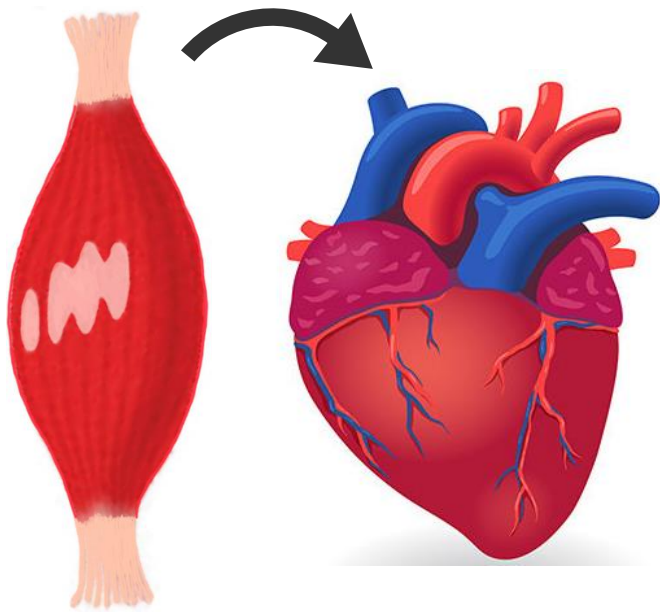
「それは重要な知見ですね。」

「次は**左心室の収縮力の指標**を探してみましょう。心筋での考え方が役に立つかもしれません。」

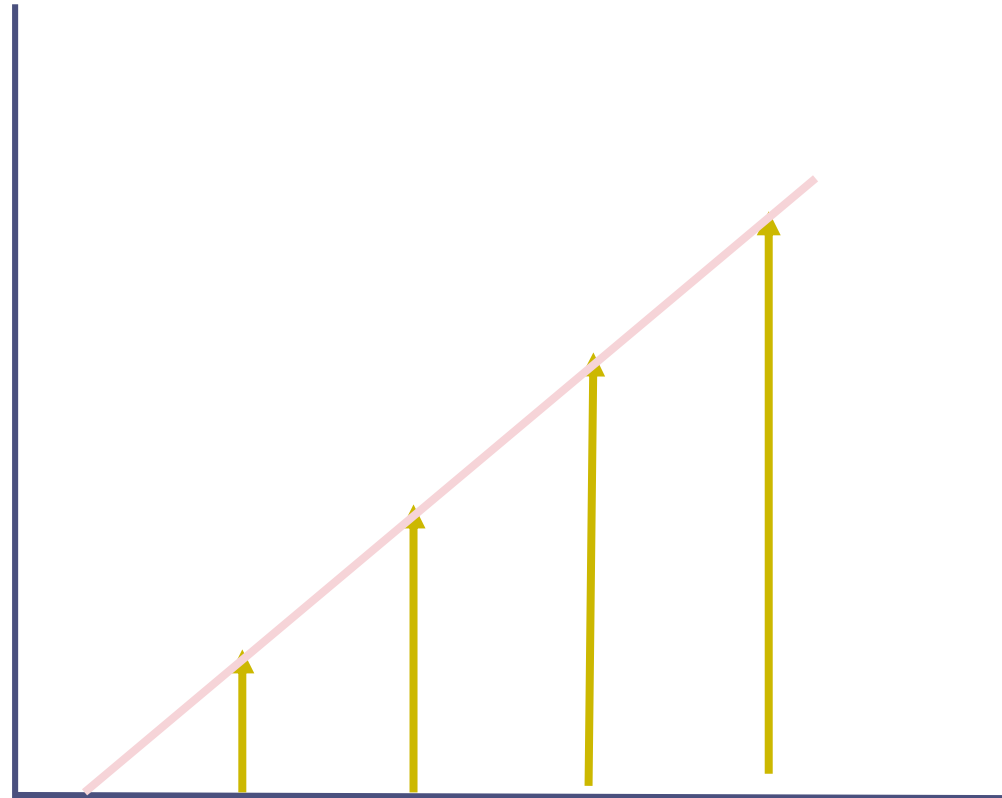
あなた

「分かりました。測ってみます。」

心筋から心室へ



張力 ↓ 圧力



長さ → 容積

以前のS研究室のカンファレンス

あなた

「**心筋**は収縮すると縮むので**長さ**の変化を見てみました。でも、重りをつけると**短縮率**は小さくなりました。」

S教授

「重りのような後負荷で変わる指標ではなく、負荷に関係ない指標（負荷非依存の指標）があればいいですね。」

「**心筋**は収縮するときに**張力**を発生するので、測ってみたらどうですか？」

あなた

「分かりました。測ってみます。」

以前のS研究室のカンファレンス

あなた

「**左室**は収縮すると縮むので**容積**の変化を見てみました。でも、重りをつけると**駆出率**は小さくなりました。」

S教授

「重りのような後負荷で変わる指標ではなく、負荷に関係ない指標（**負荷非依存の指標**）があればいいですね。」

「**左室**は収縮するときに**圧力**を発生するので、測ってみたらどうですか？」

あなた

「分かりました。測ってみます。」

S研究室のカンファレンス

あなた

「左心室の**容積は心周期で変化**するので測定するのは難しいです。」

S教授

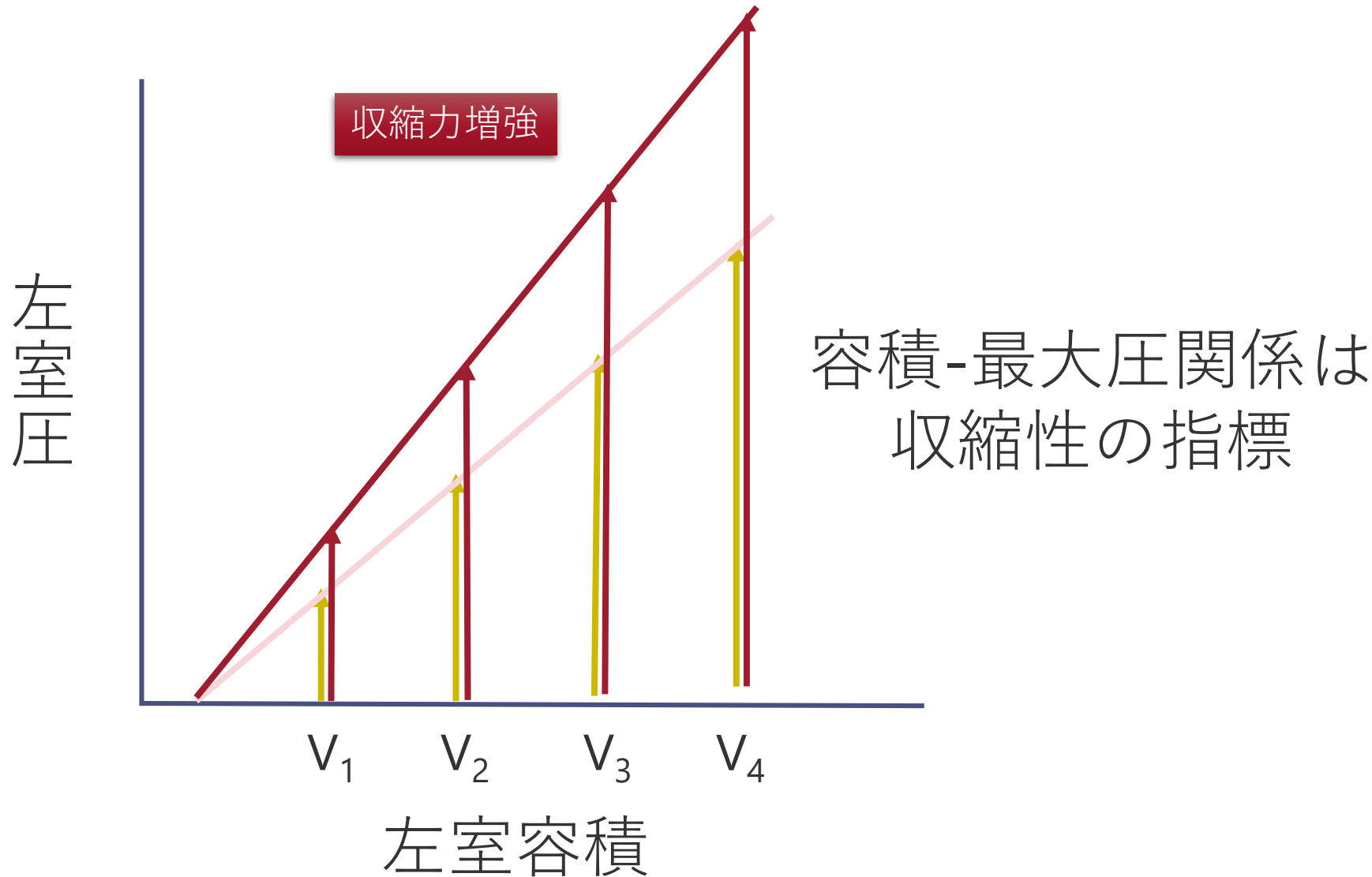
「まずは僧帽弁と大動脈弁を閉じて、**左室容積が変わらない**ようにして中の容積と圧力を測ってみてはどうですか？」

等容性収縮：isovolumic contraction

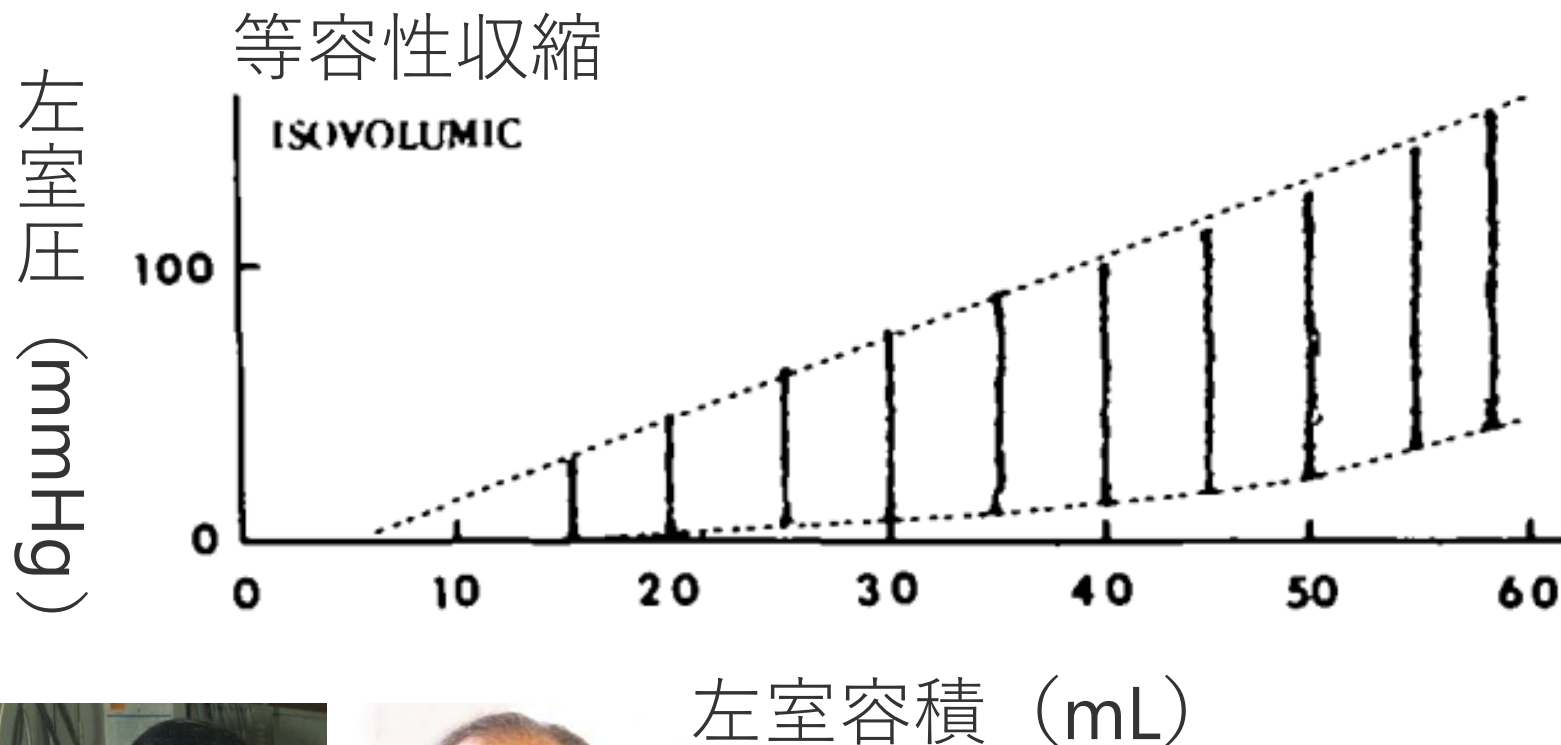
あなた

「それならできそうです。拡張末期の左室の容積を変えながら、中の圧力を測ってみたいと思います。」

左室の収縮能の測り方① 等容性収縮



左室の収縮能の測り方① 等容性収縮



Suga H, Sagawa K, Circulation Research 1974

S研究室のカンファレンス

あなた

「等容性収縮だったら心筋と同じように**左室容積と収縮期最大圧**との関係は直線となりそうです。」

S教授

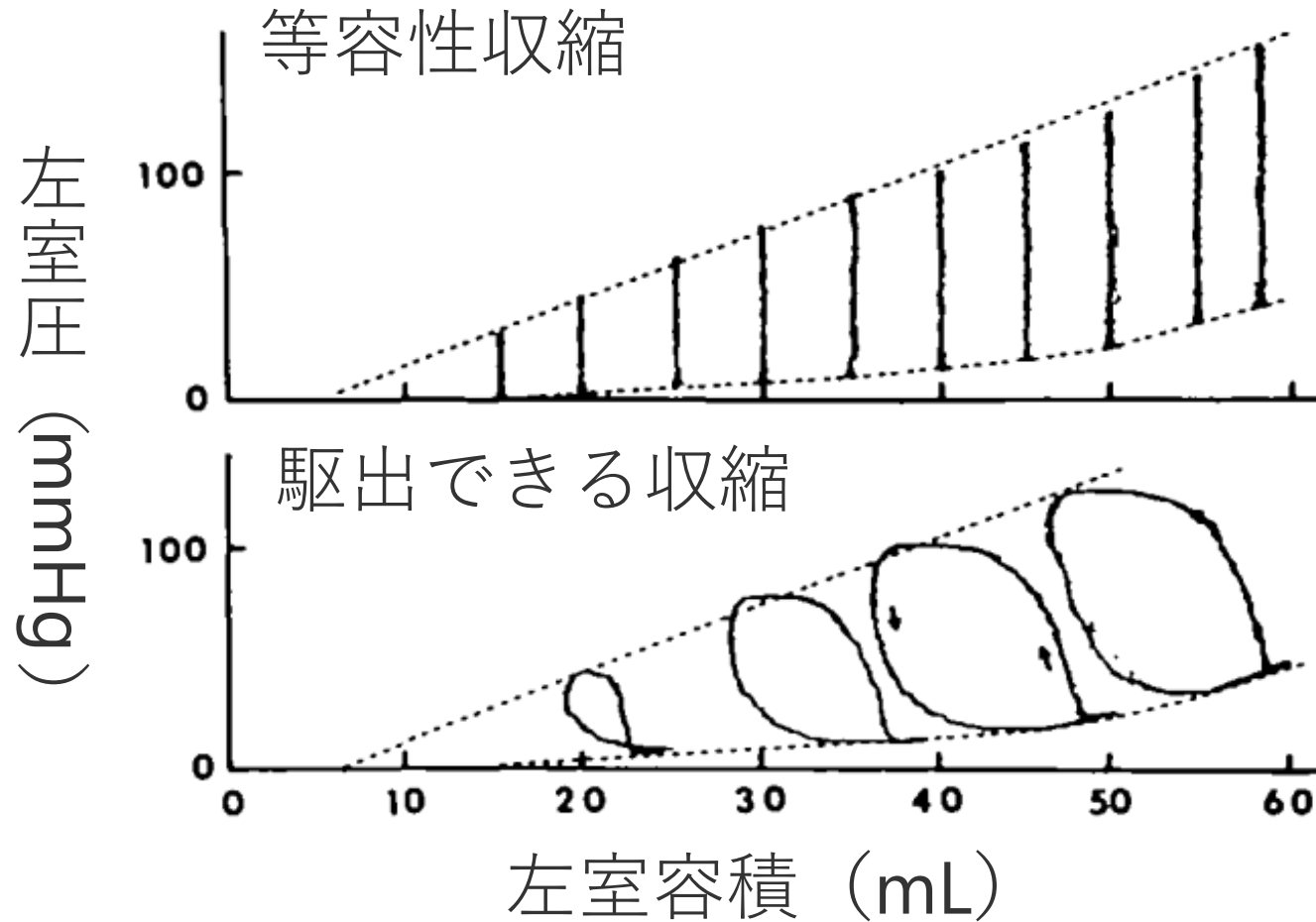
「その直線の傾きの単位は、横軸がmL、縦軸がmmHgですね。ということはその傾きはmmHg/mLです。これは**硬さ (elastance) の単位**ですね。」

「左室が駆出しながら左室容積を測れるようにする機械を作っておきました。これを使ってみなさい。」

あなた

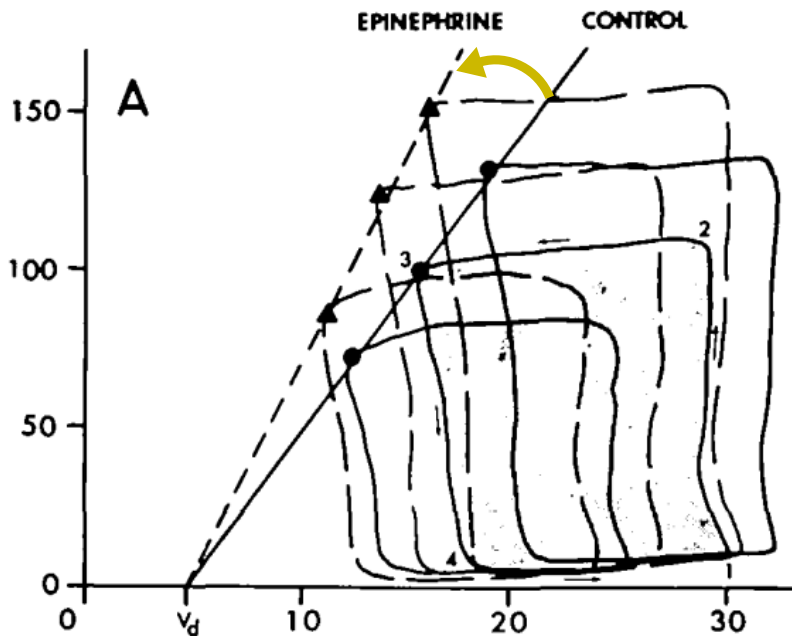
「さすがS教授！早速使ってみます。」

左室の収縮能の測り方② 駆出する左室

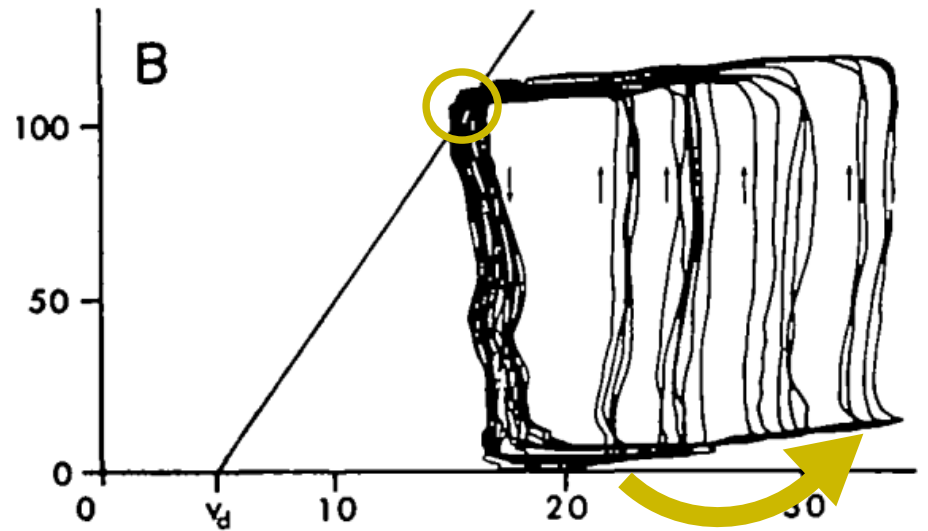


左室の収縮能の測り方② 駆出する左室

収縮力を変えてみた



前負荷を変えてみた



S研究室のカンファレンス

あなた

「PV loopの左上の点（収縮末期点）をつなげると、その傾きは負荷に依存しない収縮性を表していそうです。」

S教授

「収縮末期の硬さ（elastance）なので

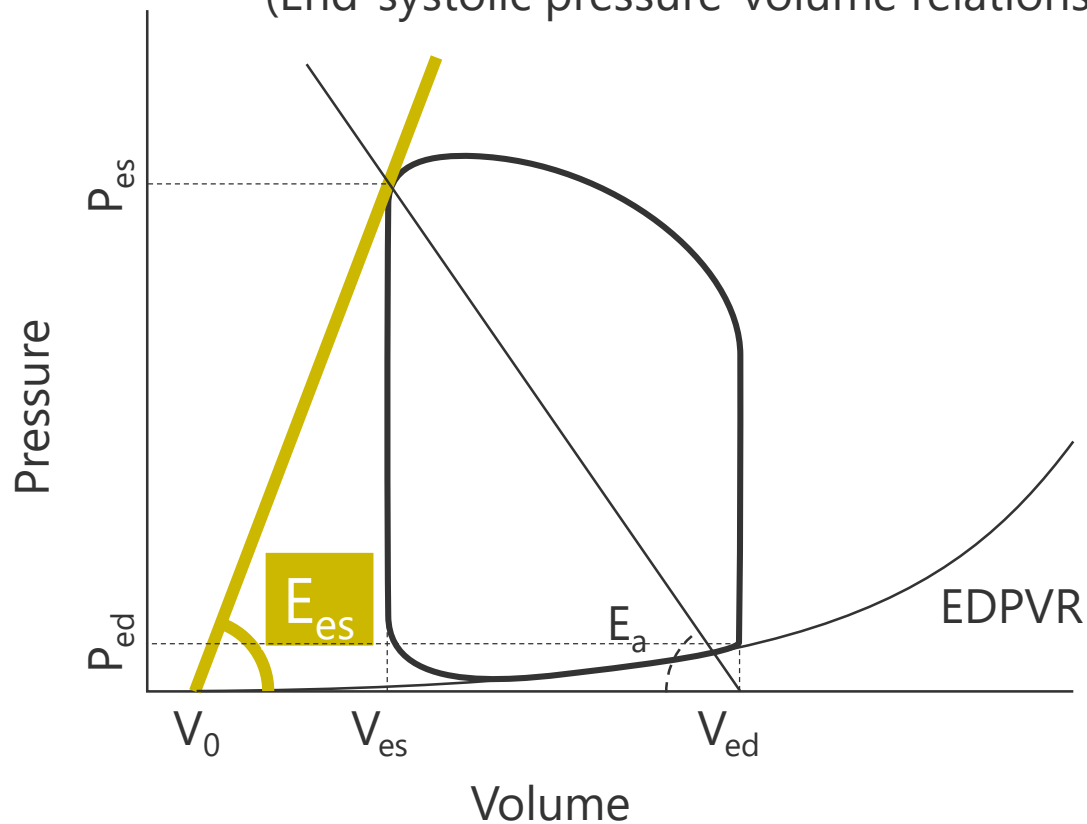
End-systolic elastance : E_{es} と名付けましょう！」

「この E_{es} は後負荷や前負荷などの**負荷非依存の収縮性**の指標ですね。」

負荷に依存しない収縮性の指標： E_{es}

収縮末期圧容積関係

(End-systolic pressure-volume relationship : ESPVR)



S研究室のカンファレンス

あなた

「エラスタンスという硬さの視点で見ると、心臓は心周期で硬さが変わっているように見えます。」

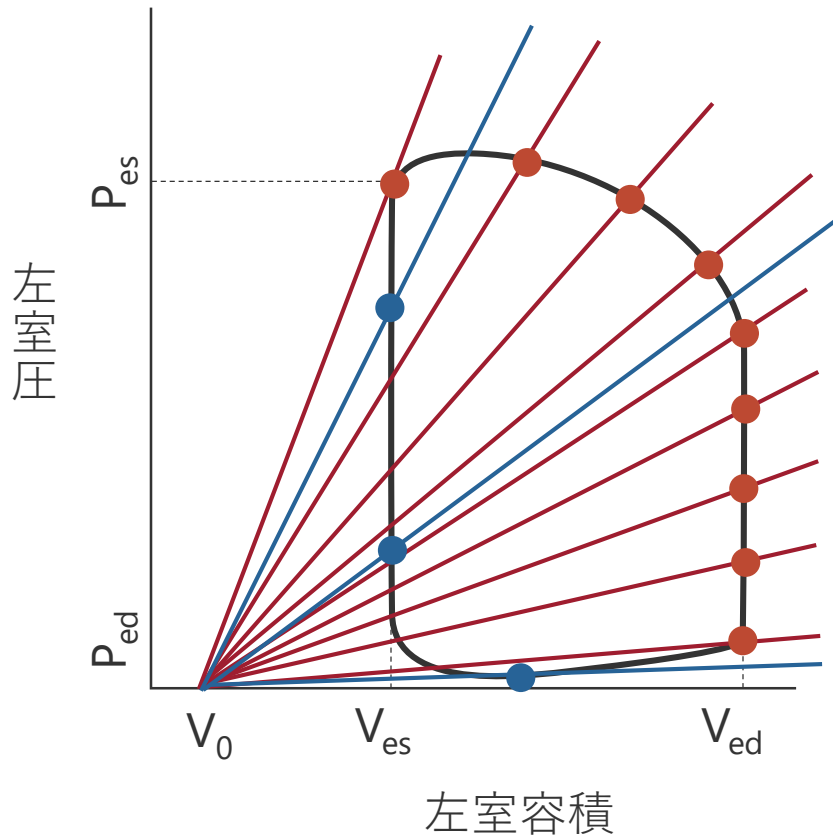
S教授

「面白いですね。これは時間で変化する硬さということで時変エラスタンスtime-varying elastance : $E(t)$ と呼びましょう。」

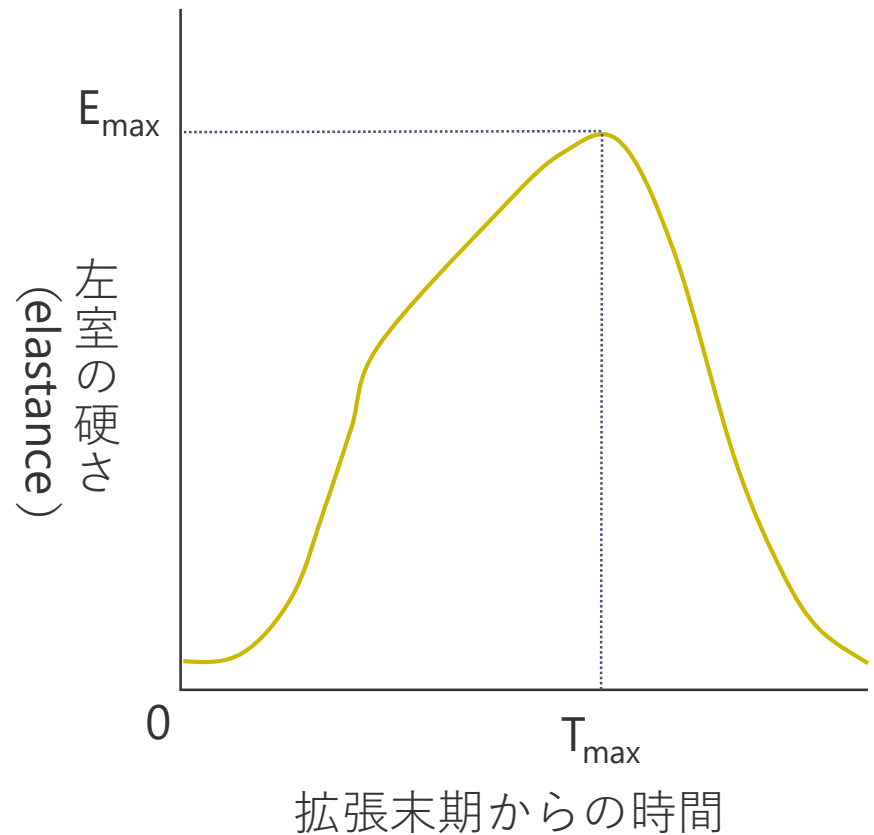
あなた

「時変エラスタンスをちょっとよく見てみます！」

左室は硬さが変わる袋：時変エラスタンス



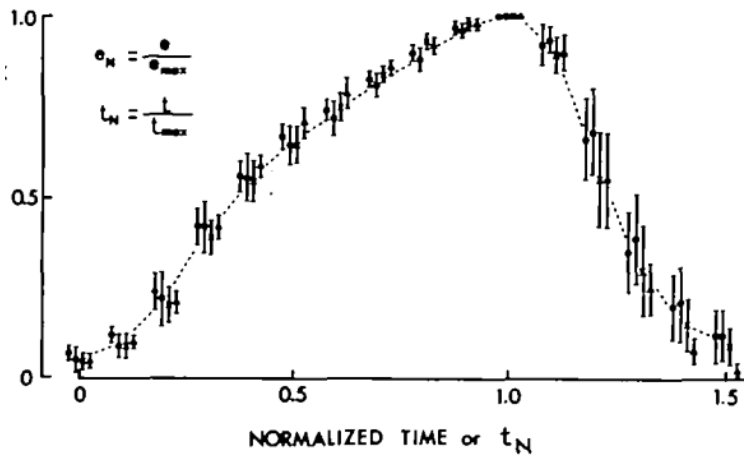
時変エラスタンス：
time-varying elastance, $E(t)$



T_{max} 、 E_{max} で規格化した $E_N(t_N)$

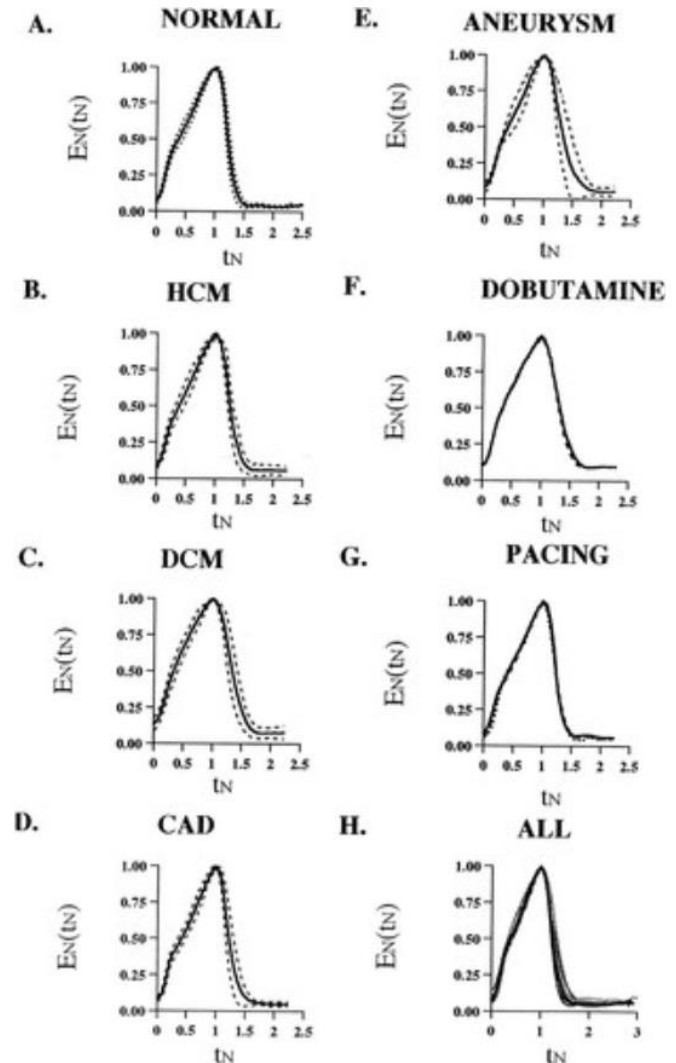
E_{max} を1となるようにした

elastance: E_N



T_{max} を1となるようにした時間 t_N

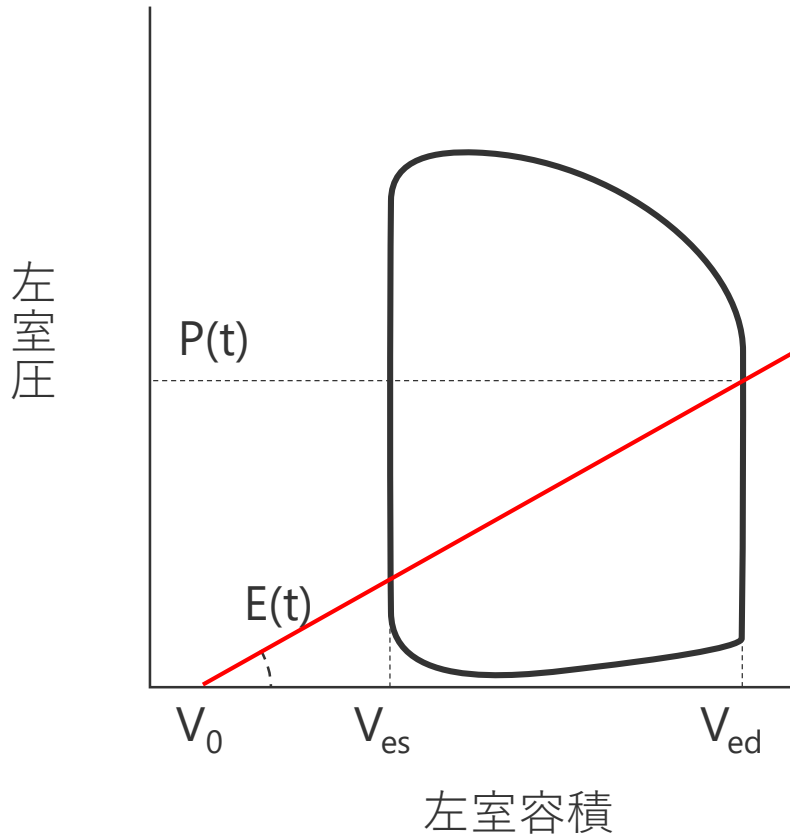
人で観察された $E_N(t_N)$



$E_N(t_N)$ は様々な状態で変わらない

Suga H, Sagawa K, Shoukas AA, Circ Res 1973
 Senzaki H et al, Circulation 1996

dP/dt最大値は収縮性？



dP/dtは左室圧Pを時間微分したものです。
ここである時間tにおける左室圧P(t)は、
時変エラスタンとE(t)を用いて以下のように
書けます。

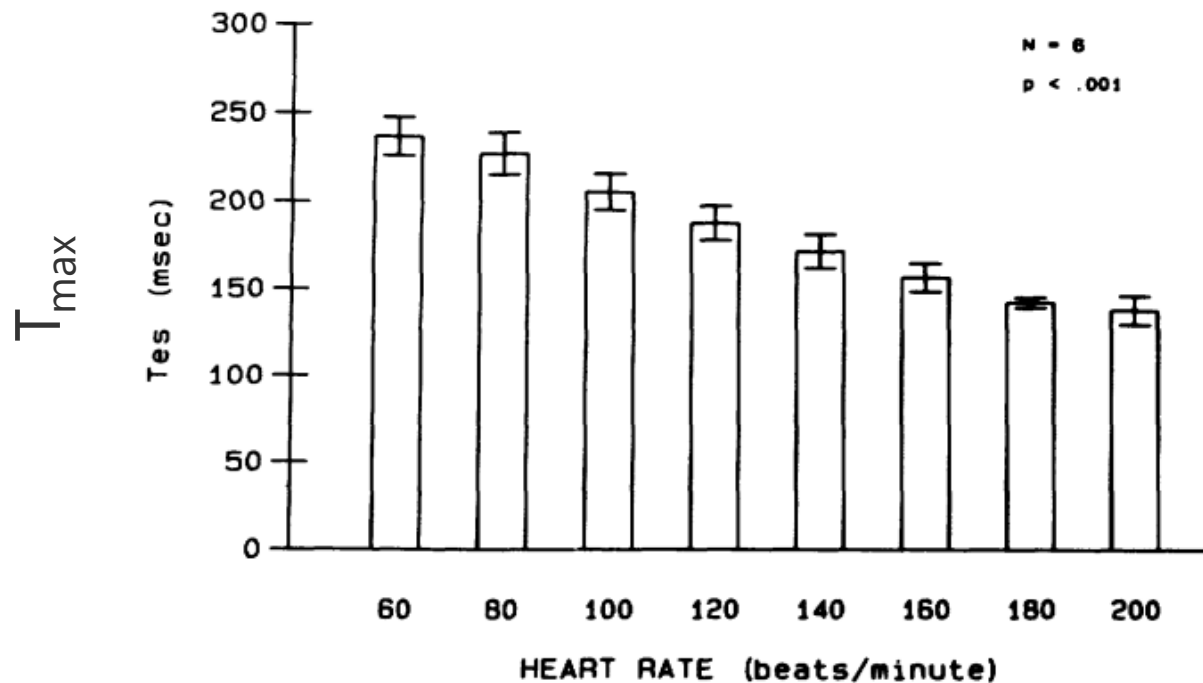
$$P(t) = E(t) \times (V_{ed} - V_0)$$

このP(t)を時間微分した最大値が
dP/dt最大値です。

E(t)を T_{max} と E_{max} で規格化した $E_N(t_N)$ を用い
て以下のようになります。

$$dP/dt_{max} = E_{max} \times \frac{1}{T_{max}} \times \left[\frac{dE_N(t_N)}{dt_N} \right]_{max} \times (V_{ed} - V_0)$$

dP/dt最大値は収縮性？ T_{max} が影響する？



心拍数

心拍数が増加すると T_{max} は短くなる

S研究室のカンファレンス

あなた

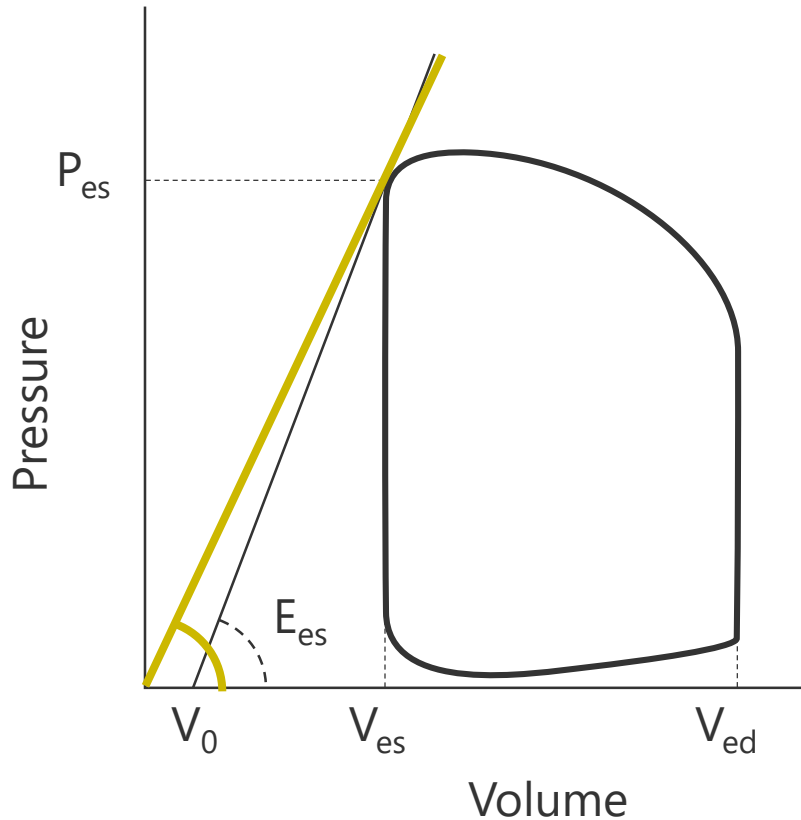
「難しかったけど **dP/dt** 最大値は収縮性と T_{\max} （または心拍数）と拡張末期容積に依存することはわかりました。注意して見ることにします。」

「ところでもっと簡単に E_{es} をイメージする方法はありませんか？」

S教授

「臨床の現場でイメージしやすいものが2つあるので教えましょう。1つは心エコーでの指標、もう1つはカテーテルで見る心室圧です。では見てみましょう！」

$V_0=0$ としてみた E_{es}



収縮末期容積を V_{es} 、収縮末期圧を P_{es} とすると

$$E_{es} = \frac{P_{es}}{V_{es} - V_0}$$

実際には V_0 を決めることが難しいです。

*これが臨床で E_{es} を使用できない大きな理由

ここで思い切って $V_0=0$ としてみましょう

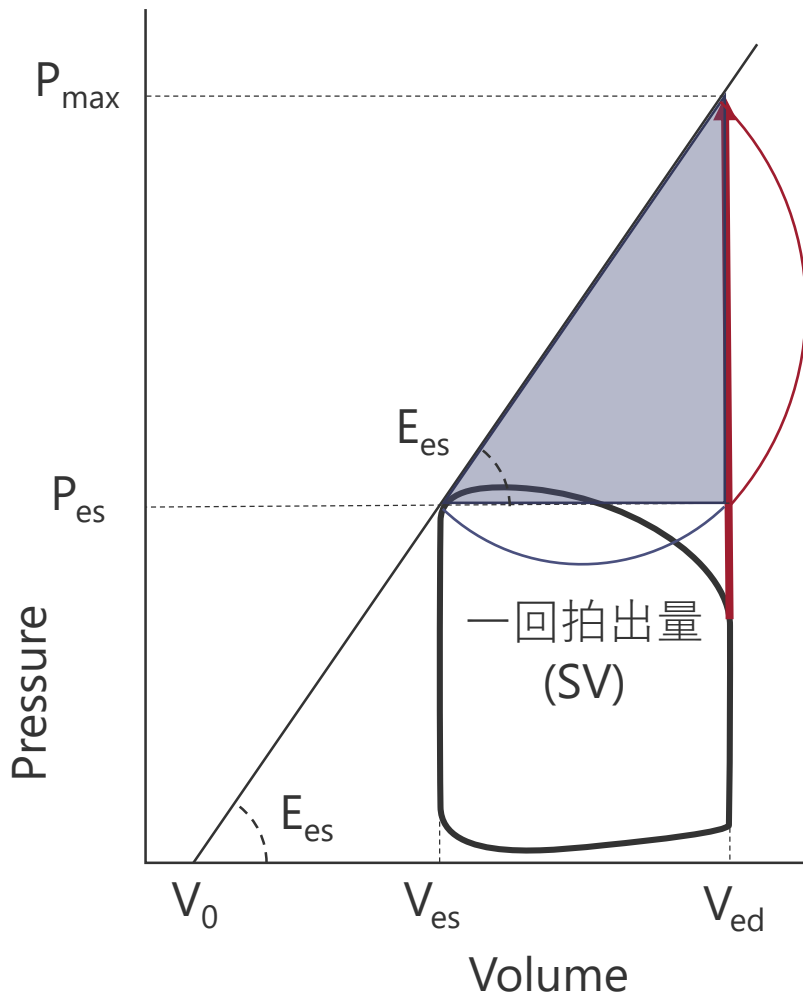
$$E_{es} = \frac{P_{es}}{V_{es}}$$

収縮末期圧 P_{es} は平均血圧とほぼ等しいので
 $P_{es}=100\text{mmHg}$ としてみましょう。

$$E_{es} = \frac{100}{V_{es}}$$

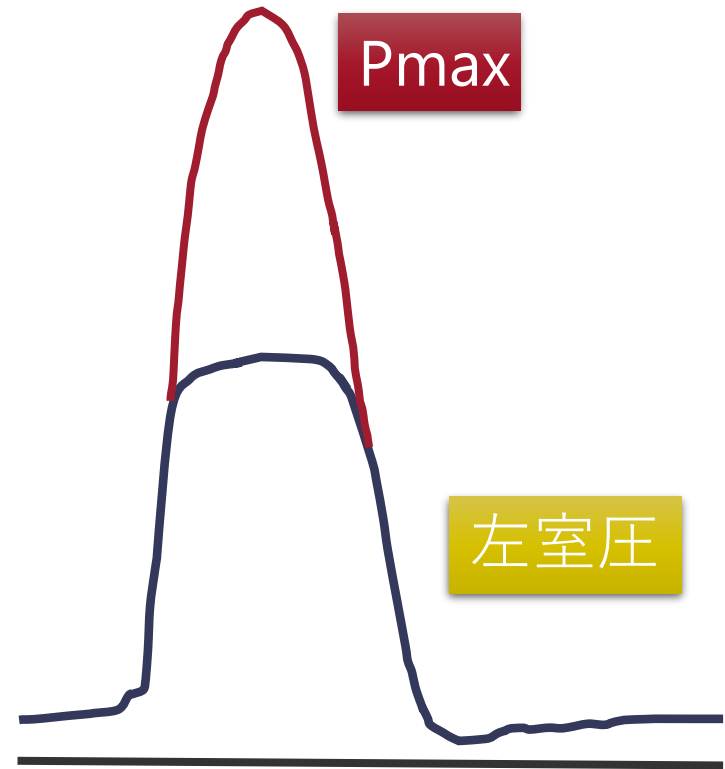
収縮末期容積 V_{es} は E_{es} と関連していることをイメージ

P_{max} を用いた E_{es} の推定



$$E_{es} = \frac{P_{max} - P_{es}}{SV}$$

P_{max} と P_{es} とSVが分かれば E_{es} がイメージできる

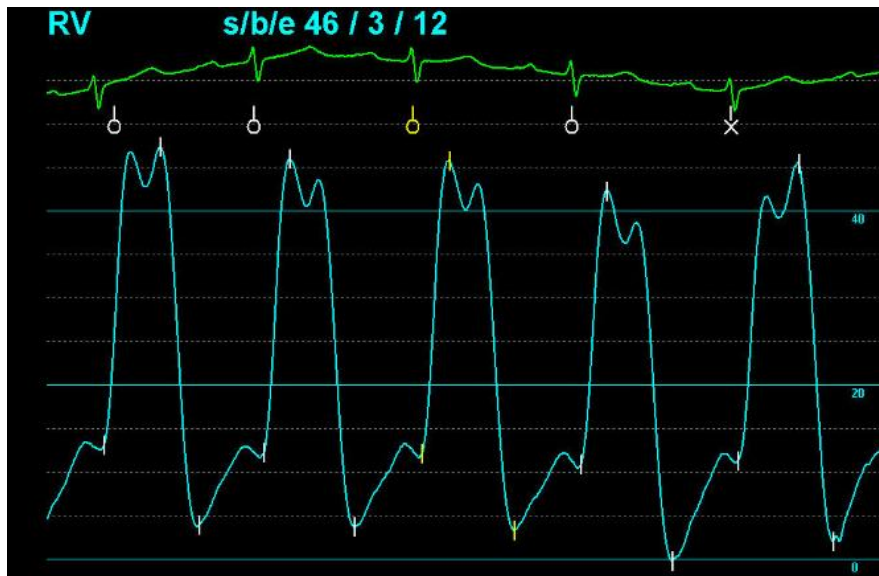


P_{\max} から心機能を推測する

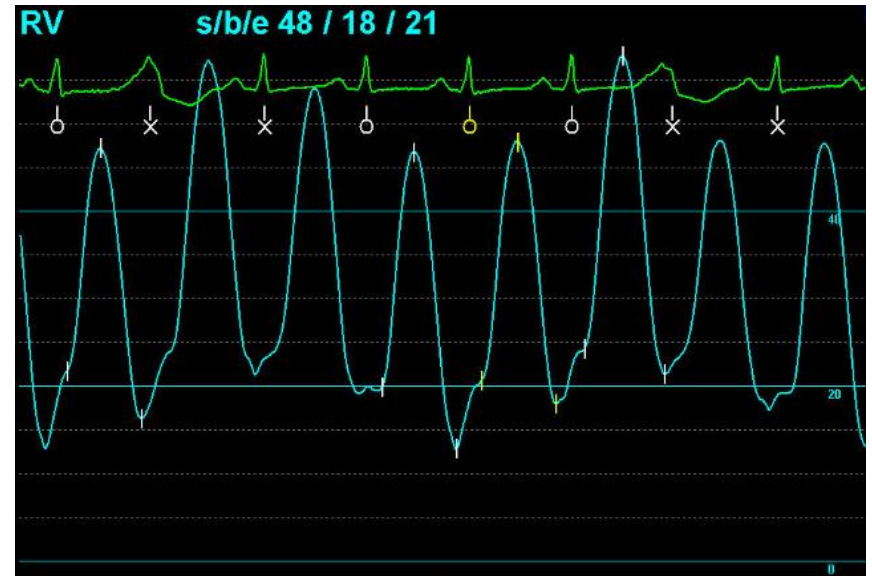
一回拍出量が同じ二人の右心室圧を見てみましょう

60歳台女性

30歳台男性



右心機能の保たれた急性MR



右心機能も低下した拡張型心筋症

Take home message

- 心機能の世界での収縮性は「負荷非依存」の収縮性 E_{es} がgold standardです。
- 駆出率は収縮性だけではなく前負荷、後負荷、心拍数により変化します。
- 心臓は硬さが変わる袋「時変エラスタンス」
- 臨床に隠れている E_{es} の指標をイメージしよう。
(dP/dt 最大値、収縮末期容積or径、 P_{max} など)