

第5章：容積脈波

Biofeedback Tutor CD

- Anatomy: Cardiovascular
- Hardware: Cardiovascular
- Clinical: Respiration

論文

- Moss, D. (2004). Heart rate variability (HRV) biofeedback. *Psychophysiology Today*, 1(1), 4-11.
- Peper, E., Harvey, R., Lin, I.M., Tylova, H., & Moss, D. (2007). Is There More to Blood Volume Pulse than Heart Rate Variability, Respiratory Sinus Arrhythmia and Cardio-Respiratory Synchrony? *Biofeedback*, 35(2), 54-61.
- Hlimonenko, I, Meigas, K., & Vahisalu, R. (2003) Waveform analysis of peripheral pulse wave detected in the fingertip with photoplethysmograph. *Measurement Science Review*, 3(2), 49-52.
- Kawachi, I (1997). Heart Rate Variability. Chapter from: John D. and Catherine T. MacArthur Research Network on Socioeconomic Status and Health, <http://www.macses.ucsf.edu/Research/Allostatic/notebook/heart.rate.html#measured>
- McCraty, R., & Tomasino, D. (2004). Heart rhythm coherence feedback: A new tool for stress reduction, rehabilitation, and performance enhancement. *Proceedings of the First Baltic Forum on Neuronal Regulation and Biofeedback*, Riga, Latvia, November 2-5.
- Gibney, H.K., & Peper, E. (2003). Taking control: Strategies to reduce hot flashes and premenstrual mood swings. *Biofeedback*, 31(3), 20-24.

はじめに

今や、専門家から一般の人に至るまで、心拍数の測定とトレーニングを行い、呼吸と同期して変動させることが可能になりました。呼吸性洞性不整脈（RSA）、呼吸性心拍変動（CRS）、心拍変動（HRV）という用語は、そのバイオフィードバック・トレーニング技術を表すときによく用いられます。このセクションの目的は、RSA・CRS・HRV トレーニングについての考え方および演習を読者に紹介することです。RSA・CRS・HRV トレーニングによって健康上多くのメリットが得られます。例えば、心拍変動のトレーニングは、疾病を回復し、健康を増進することと関連しています（Lehrer et al., 2004; Lehrer et al., 2006, De Meersman & Stein, 2007; Grossman & Taylor, 2007; Porges, 2007; Ritz & Dahme, 2006; Vaschillo, Vaschillo, & Lehrer, 2006）。ほとんどの場合、心拍数は、指または耳たぶに配置されたセンサーで記録した脈波を測定することで得られ、その後、心拍変動を表示するために処理されます。心拍変動をコントロールするトレーニングにバイオフィードバックを用いること、および心拍の記録方法を深く理解することで、学生や専門家も同じようにこのアプローチを学ぶことができ、ストレスの軽減および健康の改善のために他者をトレーニングすることができます。本章では、まず始め

に心拍数の測定に用いる一部の技術について説明します。心電計（ECG）センサーを使うこともできますが、この実習では、光電式容積脈波計（PPG）を使用します。

光電式容積脈波計（PPG）は、心拍数の変化に対応する動脈および毛細血管の血液量の変化を測定することによって心拍に伴う脈波の情報を得る装置です。PPGセンサーは赤外線を照射する（一般的に発光ダイオードを使用）ことにより、心拍数の変化を検出します。この光は組織を通して伝達され、PPGセンサーの光検出器に到達する前に組織によって後方散乱・反射されます。（図 5-1 を参照）。

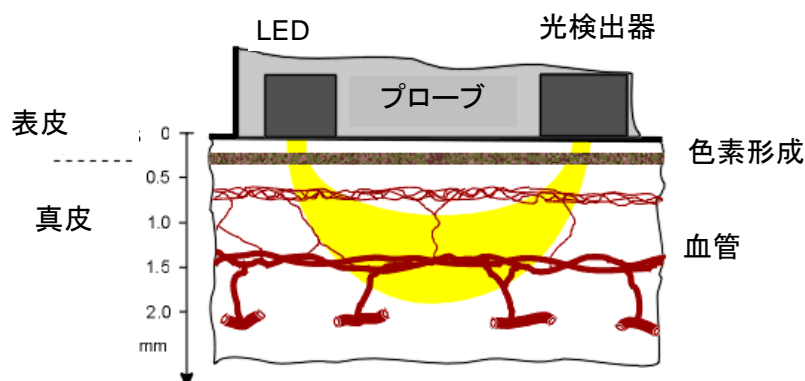


図 5-1. 光電式容積脈波センサーが組織を通して光を伝達し、容積脈波を測定する様子。Medizinische Messtechnik GmbH の許諾により複製。（<http://www.medis-de.com/>）。

さらに具体的に言うと、この技術が機能するのは、赤色光が赤血球のヘモグロビンに選択的に吸収され、その他の組織によって反射されるためです。PPG 光検出器に戻る光の量は組織血液量に比例しており、1 回の拍動を通して変動する波形として記録します。PPG 信号は、動脈、毛細血管、および光が通過するその他の組織における平均血液量を表します。このため、PPG 信号は、センサー自体の位置または向きだけでなく、センサーの真下の組織の厚さや組成にも左右されます。PPG センサーを用いて脈拍ごとに組織を通過する血液量に基づいて心拍数を検出する手法を**容積脈波（BVP）**測定といいます（Schwartz & Andrasik, 2003）。

PPG センサーのほとんどは、耳たぶから臍壁まで身体のあらゆる場所に配置することができますが、PPG 信号の記録では一般的には指に配置します。PPG 信号は、血液灌流の増加・減少を反映する血管床の相対的変化を示すために使用することもできます。また、血管壁の弾性測定、血圧の変化測定のための目的にも使用できます。PPG 信号の変化は非常に急速な場合があるため、覚醒や、場合によっては認知の突然の変化を反映することがあります。この他にも BVP の測定値に影響を及ぼす要因があり、考慮しなくてはならない場合もあります。

容積脈波（BVP）および容積脈波高（BVA）

組織を流れる血流に複数の要因が影響し、その結果として **BVP** 測定が変動します。例えば、興奮時の交感神経の覚醒の亢進などの認知的要因によって血管が収縮し、リラックス時の副交感神経の覚醒の亢進により血管が拡張します。また、組織中の血液量に影響を及ぼす環境要因もあります。例えば、体温が低い場合は、末梢部位で血管収縮が起こり、指先の血液量が低下します。麻薬や処方薬なども血液量の測定に影響を及ぼします。例えば、アルコールは血管拡張を増大しますが、ニコチンは血管収縮を増大させます。レイノー病などの疾病は、細動脈の血管収縮の原因になり、指の血流を低下させます。様々な状況の下で、指先以外の場所に **PPG** センサーを配置することがあまりお勧めできないケースがあります。

容積脈波測定 (**BVP**) の最も一般的な用途は、心拍数、末梢の血流、組織の充血などの変化の測定です。また、容積脈波高 (**BVA**) 測定の分析のために容積脈波信号を処理する場合があります。例えば、**BVA** は、皮膚温度の上昇または低下に対応して変化します。**BVA** は皮膚温度よりも急速に変化しますが、信号を処理してよりゆるやかな平均的体温信号へ調整することができます。片頭痛の治療には、体温計を用いるよりも、側頭動脈からの **BVA** の記録によって **BVA** を増大させるトレーニングについての臨床的応用が非常に幅広く行われています。(Feuerstein & Adams, 1977)。

BVP 信号には血管壁の弾性に関する情報も含まれているため、血圧および心血管の健康の指標として用いられています (Alrawi, Miranda, Cunningham, Acinapura, & Raju, 2002)。例えば、動脈壁の弾性が少なくなり、硬くなると高血圧 (**BP**) を伴う傾向があるので、**BVA** 信号の形状は血圧の指標として用いられています (Speckenbach & Gerber, 1999)。図 5-2 は、(a) 拍動間隔 (t_1) と心拍数の推定に用いられる周波数成分、および (b) 心臓の収縮により生じる血液量の相対的増加を表す脈拍振幅 (P_1) などの振幅成分を反映する信号の例を示しています。重複切痕 (マーカー3) の大きさは血管床の相対的な硬直性・弾性を示す場合があり、心臓が収縮した時の初圧力波と末梢動脈床からの反射圧力波との相互作用により左右されます。

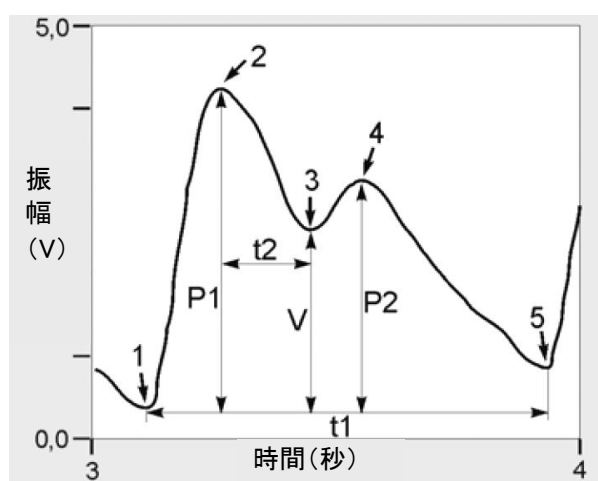


図5-2 波高および信号の分析に使用可能なタイミング・マーカーを有する BVP・BVA 信号の例。主なマーカーはマーカー1~5の間の時間 (t1) で、拍動間隔を示し、心拍数の算出に用いられます。マーカー2 (P1) は脈拍の振幅の大きさ、マーカー3は重複切痕の指標になります。Hlimonenko, Meigas, & Vahisalu, 2003 から許可取得済み。

通常、動脈壁の弾性の喪失は加齢の指標であり、心血管障害、特に高血圧症のリスクの増大を示唆しています (Izzo & Shykoff, 2001)。図 5-3 に示すように、娘とその両親の BVP と BVA の記録および血圧記録からその関連性がわかります。

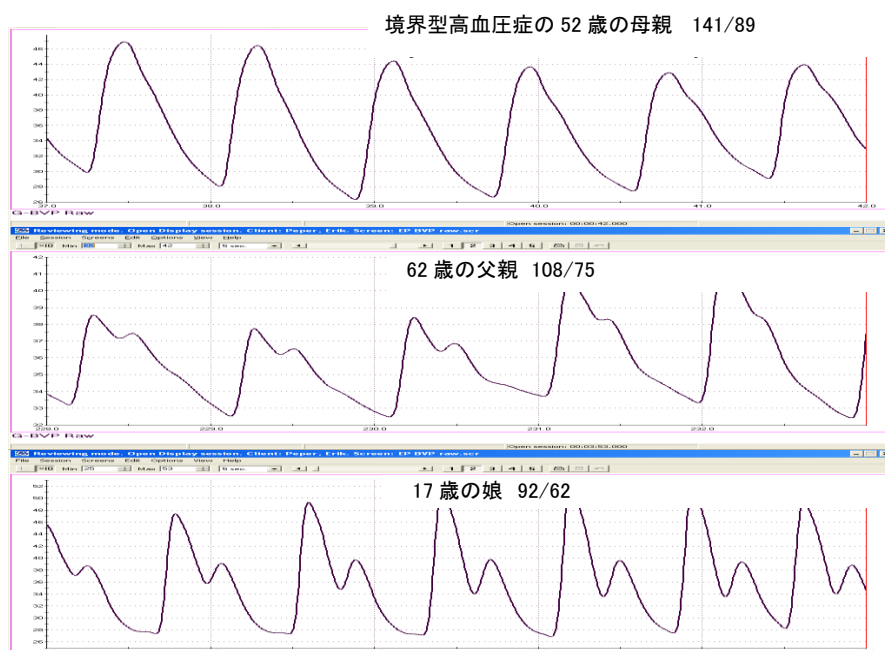


図5-3 17歳の娘、62歳の父親、および境界型高血圧症の52歳の母親との間での容積脈波記録の比較。軌跡の頂上に重複隆起がないことは、血圧上昇の兆候である動脈硬化を示唆している。

最初に BVA を使用する、および BVA の並行使用は、鼻中隔 (脳血流量の測定のため) から膈壁 (性的覚醒の測定のため) まで、あらゆる部位からの血液によって充血した組織を測定するためです。1967年という早期に Palti および Bercovic は、性的刺激に対する性的興奮の指標としての膈壁の血管充血を測定するために、BVA を用いました (Palti & Berovici, 1967; Brotto, Basson, & Gorzalka, 2004) (図 5-4 を参照)。

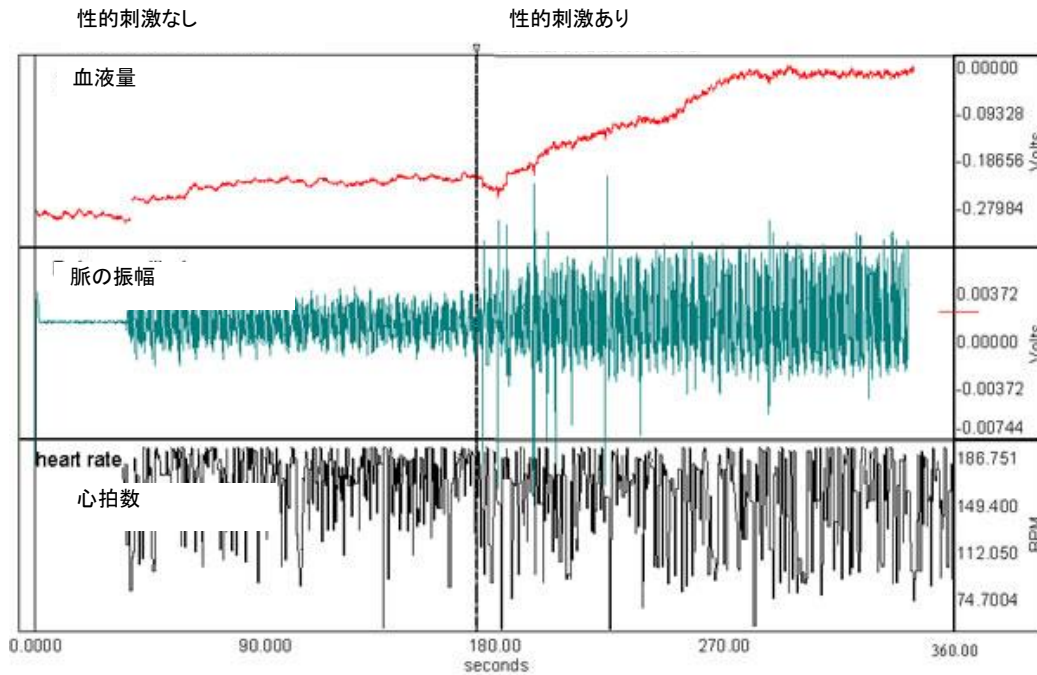


図5-4 視覚的な性的刺激による女性の膣の血液量および膣壁脈波の振幅。性的健康女性では、年齢または閉経状態にかかわらず、視覚による性的刺激を見せた数秒以内に生殖器の反応が起こる。Brotto and Gorzalka (2006)から許可取得済み。
<http://www.psych.ubc.ca/~bglab/equipment.html>

心拍変動 (HRV) トレーニングにおける PPG の基礎知識

バイオフィードバックでは、多くの場合施術者は ECG (EKG とも呼ばれる) センサーの代わりに PPG センサーを使って心拍数を記録します。これは、PPG センサーの取り扱いのほうが簡単なためです。ECG は心臓で生成する電気信号を測定するので正確性に優れていますが (ECG のピークは曲線的な BVP 信号と比べてかなり鋭い)、PPG 信号も ECG 信号と極めて高い相関性があります。臨床では、図 5-5 に示すように、PPG、ECG、および BP の測定技術の密接な相関性を診断に使用し、心室性期外収縮 (PVC) などの一部の心臓障害を検出することもできます。

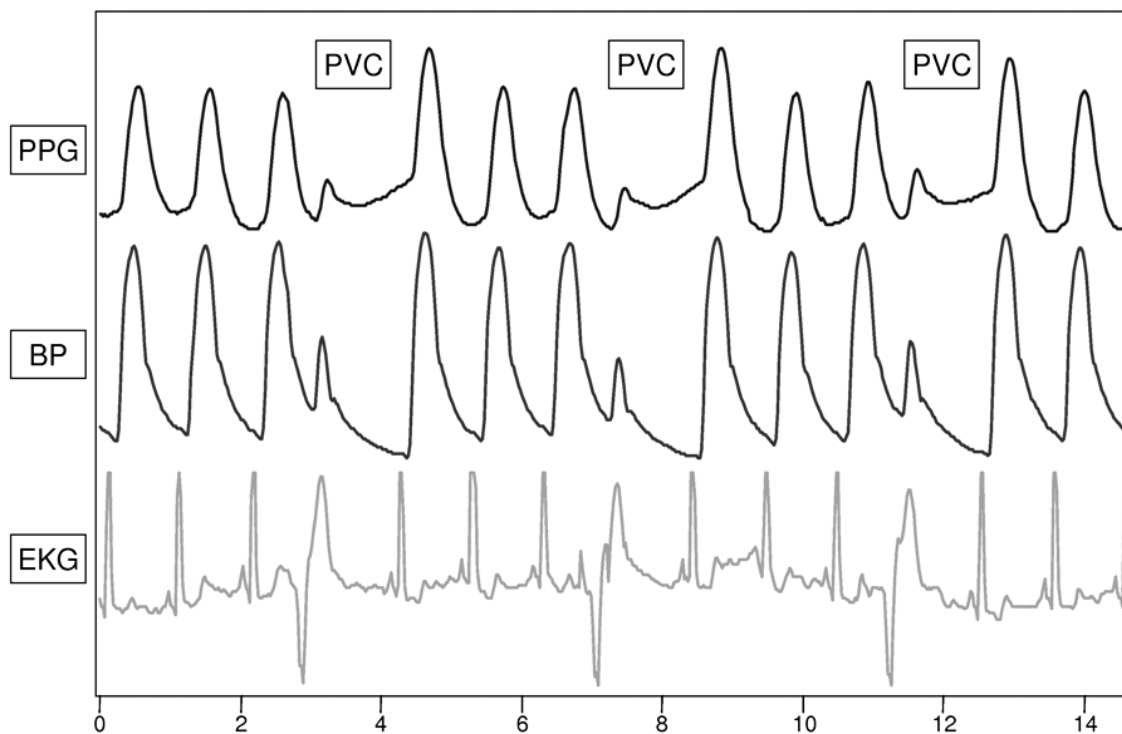


図5-5 PPG、BP（血圧）、およびEKG信号の間には密接な関係がある。臨床ではこれらの信号を不整脈などの心疾患（PVCなど）の診断のために使用し、実習では心拍数への気づきのトレーニングに使用する。

心拍変動(HRV)を増大させるためのバイオフィードバック・トレーニングは広がりつつあります。HRVバイオフィードバック・トレーニングでは、一拍ごとの拍動間隔（IBI）はBVP信号から算出されます。1分あたりの拍動の数である**心拍数(HR)**は、連続する2つの拍動間の時間（IBI）により算出されます。心拍数の算出には拍動間隔（IBI・秒単位）で60秒を割ります（図5-6を参照）。

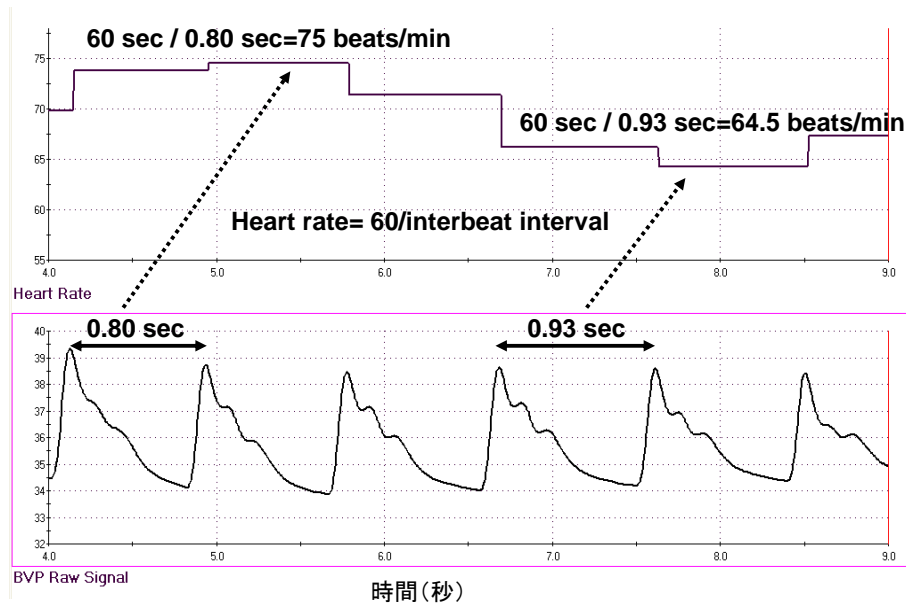


図5-6 拍動間隔を測定し、それを1分あたりの心拍に変換することによって脈拍から心拍数を算出する方法の図示例。拍動間隔 0.80 秒は、心拍数 75 に相当し、一方、拍動間隔 0.93 秒は、心拍数 65.5 に相当。

注：HRV 成分の臨床解析および研究解析に関して発表されている規格では、すべての統計的計算を正規化した IBI データで行うことを推奨しています。正規化とは余分な心拍を除去し、あるいは欠けている心拍を追加するために、連続した IBI 値を編集するプロセスのことです。（これらは一般的に BVP 生信号のアーチファクトにより生じます。）非正規化データに対して正規化データに関して行う計算を区別するには、標準拍動間隔識別子を用いることが通例となっています。正規化された拍動間隔は NN 間隔と呼ばれます。

拍動と拍動の間の時間は変動することがあるため、算出した心拍ごとの心拍数も変動します。拍動の変動性は、平均正常～正常拍動の特定の期間における標準偏差 (SDNN) (拍動間隔の平均)、または平均心拍変動の標準偏差 (SDAHR) のいずれかで説明することができます。

HRV に影響を与える主な要因の 1 つは呼吸周期です。すなわち、吸気は心拍数を増加させる傾向があり、呼気は心拍数を減少させる傾向があります。呼吸周期にわたって心拍数が加速および減速される状態は、図 5-7 に示すように、呼吸性洞性不整脈 (RSA) と呼ばれています。

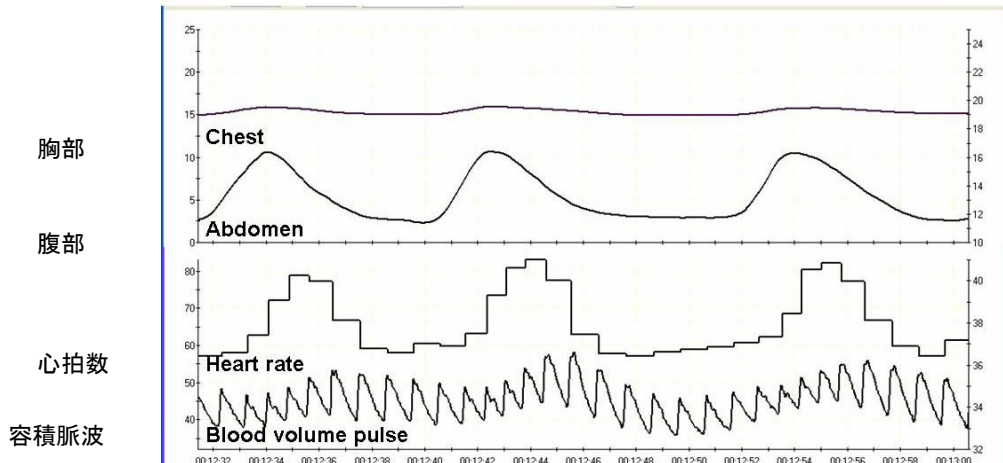


図5-7 呼吸、BVP 生信号、および得られた心拍数の記録。上記のパターンに反映されているように、心拍数が呼吸と共変する時は、呼吸性洞性不整脈が現れています。

通常、心拍変動 (HRV) は、心臓に柔軟性があり、身体の要求に反応できることを示唆しているため、若さと心臓が健康であることのサインとなります。また、HR は交感神経の活性中に増加し、副交感神経の活性中に減少するため、心拍変動は交感神経と副交感神経のバランスを示すマーカーでもあります。その一方で、HRV は、加齢と共に減少する傾向があります。心拍変動がない、または減少している時は、病変を示している場合があります (Kleiger et al., 1987; Del Pozo et al., 2004)。例えば、HRV が低い場合 (SDNN < 50 ms、SDAHR < 2.5 拍動) は、HRV が高い人 (SDNN > 100 ms、SDAHR > 5 拍動) と比べて、心筋梗塞後における死亡の相対リスクが 4 倍上昇します (Kleiger et al., 1987)。覚醒している時および不安を感じている時は、心拍数は極めて低い変動性を示しますが、リラックスしてゆっくり呼吸している時は、HRV・RSA・CRS が増加します。

呼吸性心拍変動同期 (CRS) は上記のプロセスを表す別の用語であり、通常、心で前向きな感情を抱いている時に毎分 5~7 呼吸あたりで呼吸することによって亢進されます。BVP 信号から得た心拍数バイオフィードバックを単独で用いる、または呼吸ひずみゲージからの呼吸バイオフィードバックと合わせて用いると、トレーニーは CRS・HRV・RSA を増大させる方法を学ぶことができます。相対的に、トレーニングを受けていない人は、図 5-8 に示すように、CRS・HRV・RSA を示さないか、低い CRS・HRV・RSA を示します。安静横隔膜呼吸時に、心拍数の変動にあわせるように呼吸トレーニングを行うと、CRS・HRV・RSA を増大させることができます (図 5-9 を参照)。

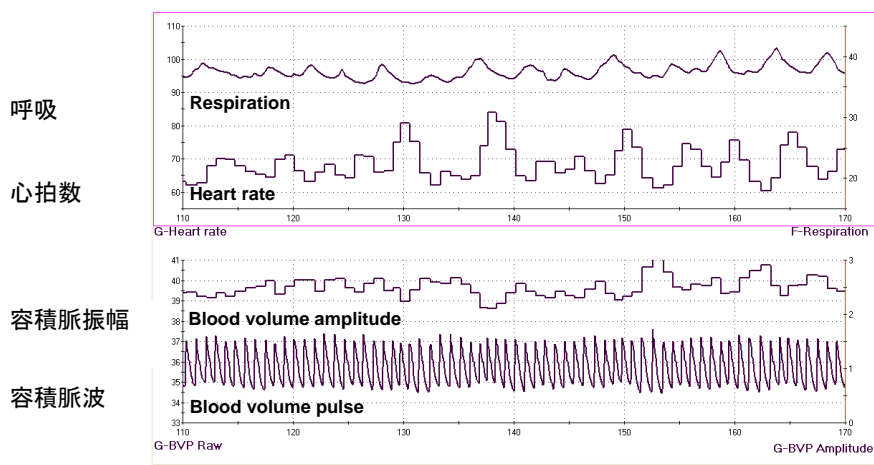


図5-8 トレーニング前の容積脈波、容積脈振幅、心拍数、および呼吸。呼吸数は毎分14回、対応する心拍数は毎分68/分、SDは5.0 (SDAHR) になる。

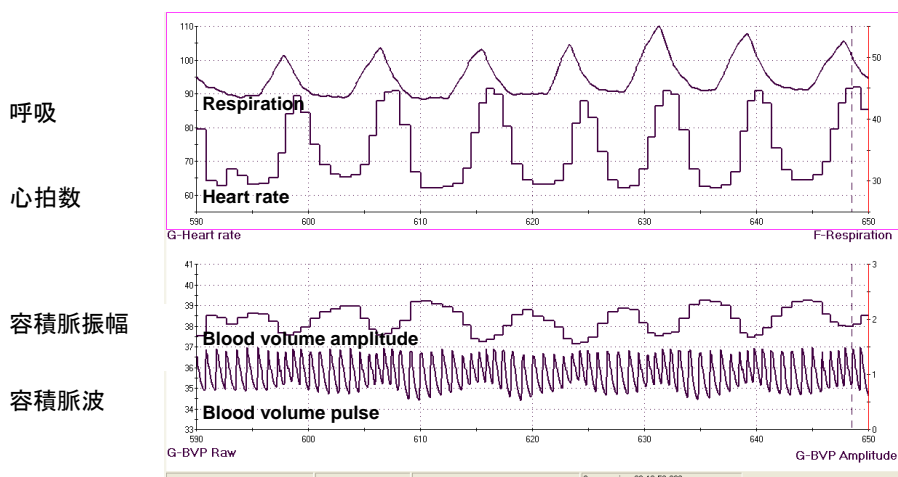


図5-9 CRSを増大させるトレーニング中の容積脈波、容積脈振幅、心拍数、および呼吸。呼吸数は毎分7呼吸で、対応する心拍数は毎分73/分、SDは10.1になる。

呼吸を心拍変動のリズムにあわせるトレーニングをおこなうバイオフィードバック・プロトコルは、この数年間で一般的な手法になりました。その理由として、この方法はCRS・RSA・HRVを増大させるということが挙げられます。Vaschillo、Vaschillo、およびLehrer (2006) は、呼吸性心拍変動または呼吸性洞性不整脈の最適レベルは毎分約6~8呼吸あたりで現れることを示しました。また、生理的健康とは、心拍数が吸気中に増加し、呼気中に減少することで、循環器システムと呼吸システムの共変動のバランスがとれていることであると定義されるということを提言しています。HRVトレーニングは、喘息、心血管障害、不整脈、高血圧を減少させると考えられています。(Lehrer et

al., 2004; Lehrer et al., 2006; Ritz & Dahme, 2006; Vaschillo, Vaschillo, & Lehrer, 2006; De Meersman & Stein, 2007; Grossman & Taylor, 2007; Porges, 2007).

HRV 信号は、図 5-10 に示すように、スペクトル分析によって解析することもできます。HRV のパワースペクトルは、以下の 4 つの主な成分に分類されています。高周波 (HF) 成分 (0.15 Hz~0.40 Hz) は、洞房結節の調節における迷走神経の影響を測定します。低周波 (LF) 成分 (0.04 Hz~0.15 Hz) は、特に正規化した単位で測定すると、交感神経が心臓に与える影響の指標となります。超長波 (VLF) 成分 (0.003 Hz~0.04 Hz) は、化学受容器、温度受容器、レニン・アンジオテンシン系、その他の非定型的要因など、心臓への複数の要因の影響を反映します。HRV の短期スペクトル分析からの変動性の大部分は、これら 3 つの成分で把握できます。超低周波 (ULF) 成分 (0~0.0033 Hz) は、長期間にわたるサンプリング中の HRV スペクトルで観察することもできます。

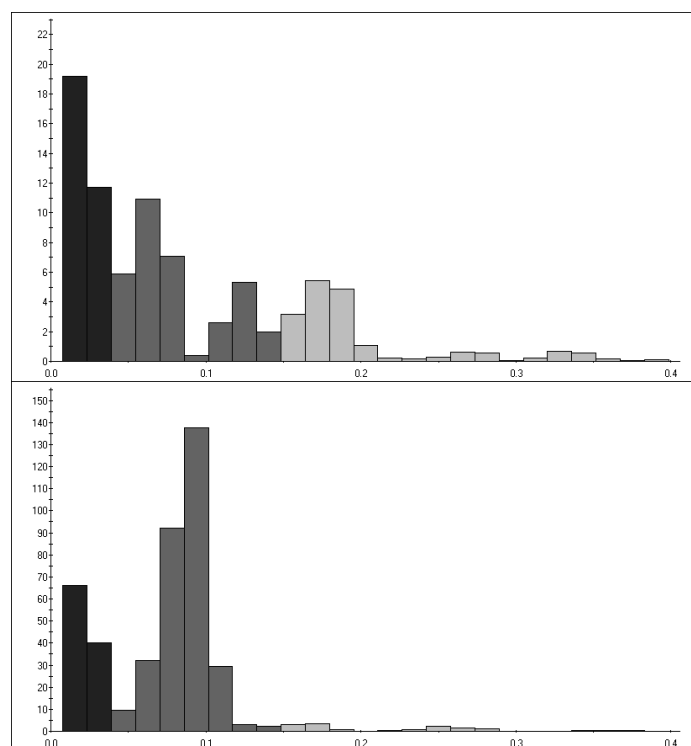


図 5-10 パワースペクトル：同一人物において、RSA および対応する共振周波数のない場合（上）と有する場合（下）

パワースペクトル内では、ピーク周波数（すなわち、最大振幅を有する周波数帯）が測定されます。極めて特異的な呼吸数では、ピーク周波数の振幅が劇的に増大することがよくありますが、このピーク周波数を**共振周波数**といいます。HRV のバイオフィードバック・トレーニングの大部分は、交感神経と副交感神経のバランスの向上に関連していると思われる、約 0.1 Hz の共振周波数のトレーニングを重点的に行います。ほとんどのトレーニーは、前向きで楽観的な態度を保ちながら 1 分あたり約 6 回の呼吸をする

と、この共振周波数が増大します。HRV トレーニングは、自宅や職場にしながら健康を増進する最も一般的なバイオフィードバック・アプローチの1つになりつつあります。これは、HeartMath™、StressEraser™、Wild Divine™（装置のメーカーについては別紙を参照）などの携帯型 HRV 装置が急速に普及したことによるものです。これらの装置は、HRV バイオフィードバックが行われる場所を実験室や臨床の場から、一般的な日常生活の場へと移しました。これらの装置を自宅や職場で使用することで、HRV を増加・減少させる要因を自覚することができます。一般的に、過度の覚醒や浅く速い呼吸、および恐怖、心配、怒り、パニック状態により HRV が減少します。反対に、1分あたり5~7回の速度での穏やかな呼吸、および感謝や愛などの肯定的な感情を表現すると HRV が増加します。

研究分野

携帯型の比較的安価な HRV トレーニング装置を使用することにより、生理状態に影響を及ぼす要因への気づきを高めることができます。HRV トレーニングを通じて、トレーニーは交感神経・副交感神経のバランスを高め、疾病を予防および回復する戦略をマスターすることができます。HRV パワースペクトルのコンピュータ化した高速フーリエ変換 (FFT) 分析は、バイオフィードバック・トレーニングを容易にするだけでなく、以下のようにバイオフィードバック研究およびトレーニングの新しいテーマの開拓を促します。

- 血管壁の柔軟性を高め、高血圧を軽減するための重複切痕の変化の分析およびトレーニング。
- 複数の位置から記録した PPG 波形と中国医学の脈診との関係性。これは硬くふれる脈は加齢や病態の指標であるという昔からの経験に基づいています。
- ストレス関連疾病を軽減するための 0.1 Hz（1分間に6回の呼吸）および高血圧の治療のための 0.5 Hz（1分間に3回の呼吸）の各共振周波数を使ったバイオフィードバックトレーニング研究。
- 疾病および健康の指標としての血流変化の研究。交感神経支配による複数の異なった皮膚知覚帯における PPG 同時測定。
- 男女双方の性機能障害の継続的な治療や分析、およびオルガスムの質を高める方法の検討。陰茎および膣壁の充血と、性的興奮につながる可能性がある他の身体部位における末梢血流の変化との相関関係に関する研究など。
- PPG 測定と心理療法との併用。脈波の波高の急速な変化は認知的および感情的反応を示すことがある。
- 糖尿病性潰瘍および凍傷の症例において、PPG 振幅を増大させる方法を教え、循環を亢進し、再生を増進させること（[Rice & Schindler, 1992](#); [Graul et al., 2004](#)）。
- 片頭痛、レイノー病、その他の血管関連疾患の治療として、バイオフィードバックを使って BVA の随意コントロールを習得する。

終わりに

本章では、容積脈波バイオフィードバックを理解するために必要な測定の基本について概説しました。ここで述べている内容は本テキストの実習に必要な予備知識として選択しました。そのため、皮膚電気活動の理論についてさらに理解を深めるためには、以下の参考図書をご参照下さい。

BVP 頭字語の略語

BVA: 容積脈振幅

BVP: 容積脈波

CRS: 呼吸性心拍変動

FFT: 高速フーリエ変換

HR: 心拍数

HRV: 心拍変動

NN: 標準拍動間隔（正規化した拍動間隔）

PPG: 光電式容積脈波記録

RSA: 呼吸性洞性不整脈

SDNN: 平均化標準拍動間隔標準偏差

SDAHR: 平均心拍数の標準偏差

参考文献

- Alrawi, S.J., Miranda, L.S., Cunningham, Jr., J.N., Acinapura, A.J., & Raju, R. (2002). Correlation of blood volume values and pulmonary artery catheter measurements. *Saudi Medical Journal*, Nov, 23(11), 1367-72.
- Brotto, L. A., & Gorzalka, B. B. November 10, 2006.
<http://www.psych.ubc.ca/~bglab/equipment.html>
- Brotto, L. A., & Gorzalka, B. B. (2002). Genital and subjective sexual arousal in postmenopausal women: Influence of laboratory-induced hyperventilation. *Journal of Sex and Marital Therapy*, 28(S), 39-53.
- Brotto, L. A., Basson, R., & Gorzalka, B. B. (2004). Psychophysiological assessment in premenopausal sexual arousal disorder. *The Journal of Sexual Medicine*, 1, 266-277.
- Del Pozo, J.M., Gevirtz, R.N., Scher, B., & Guarneri, E. (2004) Biofeedback treatment increases heart rate variability in patients with known coronary artery disease. *American Heart Journal*, 147(3), G1-6.
- De Meersman, R.E. & Stein, P.K. (2007). Vagal modulation and aging. *Biological Psychology*, 74(2), Feb, 165-173.
- Feuerstein, M., & Adams, H. E. (1977). Cephalic vasomotor feedback in the modification of migraine headache. *Applied Psychophysiology and Biofeedback*, 2(3), 214-254.

- Graul, M., Stanculescu, A., Peper, E., Johansen, K.L., & Doyle, J.W. (2004). Possible treatment of diabetic ulcer for a kidney dialysis patient: A case report. Abstract in: *Applied Psychophysiology and Biofeedback*, 29(4), 299.
- Grossman, P., & Taylor, E.W. (2007). Toward understanding respiratory sinus arrhythmia: Relations to cardiac vagal tone, evolution and biobehavioral functions. *Biological Psychology*, 74(2), Feb, 263-285.
- Hlimonenko, I, Meigas, K., & Vahisalu, R. (2003) Waveform analysis of peripheral pulse wave detected in the fingertip with photoplethysmograph. *Measurement Science Review*, 3(2), 49-52.
- Izzo, J. L., & Shykoff, B.E.(2001). Arterial stiffness: Clinical relevance, measurement, and treatment. *Review Cardiovascular Medicine*, 2(1), 29-34, 37-40.
- Kleiger, R. E., Miller, J.P., Bigger, J.T., et al, and the Multicenter Post infarction Research Group. (1987). Decreased heart rate variability and its associatin with increased mortality after acute myocardial infarction. *American Journal of Cardiology*, 59, 256-262.
- Lehrer, P.M., Vaschillo, E., Vaschillo, B., Lu, S.F., Scardella, A. Siddique, M., & Habib, R.H. (2004). Biofeedback treatment for asthma. *Chest*, 125(2), 352-61.
- Lehrer, P.M., Vaschillo, E., Lu, S.F., Eckberg, D., Vaschillo, B., Scardella, A., & Habib, R.H. (2006). Heart rate variability biofeedback: Effects of age on heart rate variability, baroreflex gain, and asthma. *Chest*, 129(2), 278-84.
- Palti, Y., & Bercovici, B. (1967). Photoplethysmographic study of the vaginal blood pulse. *Am J Obstet Gynecol*, 97(2), 143-53.
- Porges, S. (2007). A phylogenetic journey through the vague and ambiguous Xth cranial nerve: A commentary on contemporary heart rate variability research. *Biological Psychology*, 74(2), Feb, 301-307.
- Rice, B.I., & Schindler, J.V. (1992). Effect of thermal biofeedback-assisted relaxation training on blood circulation in the lower extremities of a population with diabetes. *Diabetes Care*, 15(7):853-8.
- Ritz, T., & Dahme, B. (2006). Implementation and Interpretation of Respiratory Sinus Arrhythmia Measures in Psychosomatic Medicine: Practice Against Better Evidence? *Psychosomatic medicine*, 68(4), 617 –627.
- Schwartz, M.S., & Andrasik, F. (2003). *Biofeedback: A practitioner's guide* (3rd ed.). New York, NY, Guilford Press.
- Speckenbach, U., & Gerber, W.D. (1999). Reliability of infrared plethysmography in BVP biofeedback therapy and the relevance for clinical application. *Appl Psychophysiol Biofeedback*, 24(4), 261-5.
- Vaschillo, E.G. , Vaschillo, B., & Lehrer, P.M. (2006). Characteristics of resonance in heart Rate variability stimulated by biofeedback. *Applied Psychophysiology and Biofeedback*, 31 (2), 129 –142.