



Respiratory Sinus Arrhythmia: A Phenomenon Improving Pulmonary Gas Exchange and Circulatory Efficiency

CIR.94.4.842.94:842-847

生体計測技術の発展

近年、Apple Watchが心臓の健康に関する情報を通知することはよく知られている。Apple Watchは心房細動^{☆1}を示唆する不規則な心拍リズムをセンシングしている。動悸や眩暈といった症状が頻繁にあっても、強い痛みを感じない場合、自身の心房細動に気づくことが難しい。私たちの身近にあるウェアラブルセンサは、脳梗塞を起こす心臓の病気を早期発見する救世主となっている。

身体から発せられるさまざまな情報を取り出す生体計測技術は、デジタル信号処理、解析支援システム、モデル化やシミュレーション技術を通じて日々開発が進んでいる。心電図、脈波、体温、加速度などの健康につながるヒトの生体情報のリアルタイム取得は、健康維持や疾患スクリーニングに活用できるほか、眠気や疲労など生体の異常状態を検出可能で、生理指標や感性指標として人間を定量的に可視化することもできる。

ヒトの状態を科学的なデータで推定していくことは、健康診断における心電図検査を始め、私たちの暮らしに馴染みのあるものである。さまざまなヒト生体信号処理技術が私たちの健康を支えており、この傾向は、健康長寿で幸せな暮らしの実現に向けて今後ますます顕著になっていくと思われる。

☆1 心房の収縮が失われることで心室が不規則に収縮している状態。長期の心房細動は心臓機能の破綻を引き起こし、心不全に繋がる。

心電図研究

生体信号の中でも、心臓の電氣的興奮の過程を記録した「心電図」を解析することで得られる情報は、心拍数を把握するだけでなく、非侵襲で計測できる生体信号の中で、細かな粒度でヒトの活動や状態を評価することができる。そのため、医工学研究者や循環器専門医などが心拍変動解析とその解釈研究に取り組んでいる。また、心臓と脳は神経細胞同士は神経伝達物質を介して交信しており、運動時には心拍数や血圧を上げて呼吸を速めるなど、指令信号を出力する。心拍情報である心拍変動^{☆2}を解析することで、脳の状態を推定することが可能である。

脳波は常に微小な電気現象(0.5-30Hzの周波数範囲の変化を持つ20-70 μ Vの波型信号)を扱うため、脳以外から発生する電位が混入しやすく、手軽な計測・解析が難しい。近年普及した磁気共鳴画像撮影法(Magnetic Resonance Imaging, MRI)やX線を用いて体の断層写真を撮影するCT検査(Computed Tomography)といった脳画像診断はコストがかかる。そのため、心拍変動解析は、私たちの生体情報を推定するにあたり多くの示唆を与え、臨床検査にも欠かせない手段として使われているのである。

本稿では、心電計から得られた心拍変動と呼吸信号から心拍動の呼吸性の変動成分(呼吸性洞性不整脈, Respiratory Sinus Arrhythmia, RSA)の抽出に成功したHayanoらによる画期的な論文を紹介す

☆2 心拍変動(HRV)は心拍間の時間間隔変動の生理学的現象で、健康者の心臓は一定の拍動間隔を維持していない。

る。論文が掲載された Circulation 誌のインパクトファクターは 29.7 (2021 年 12 月現在) !

呼吸性洞性不整脈 (RSA)

呼吸と心拍数の関係は、心臓自律神経と密接に連動している。呼吸時に心電図 RR 間隔 (図-1) が短縮し頻拍となり、逆に呼気時には徐拍となり RR 間隔は延長する。この現象が呼吸性洞性不整脈 (RSA) であり、心拍の呼吸性ゆらぎである。Hayano らは、安静覚醒時のイヌのポリグラフィ (多用途監視装置、複数の生理反応を同時に記録する装置) を解析して、呼吸と循環の相互作用を通じて RSA の生理学的意義を明らかにしたのである。

これまでの研究において、RSA の機序は、呼気と吸気の交代とリズムの調節にかかわる呼吸中枢と吸気を抑制する肺膨張反射による心臓迷走神経活動の調節と理解されており、RSA の振幅は心臓迷走神経活動に伴って増加すると考えられていた。RSA が能動的な生理的役割を果たしているのか、あるいは単に呼吸に対する心拍数の受動的な反射を反映しているだけなのか不明であった。そこで Hayano らは、RSA が呼吸サイクル内で呼気と吸気を一致させることにより、肺ガス交換を促進するという仮説を立てた。

7 頭の麻酔犬を用いて RSA を模擬したモデルを作成し、内因性の自律神経活動を薬理で取り除いた

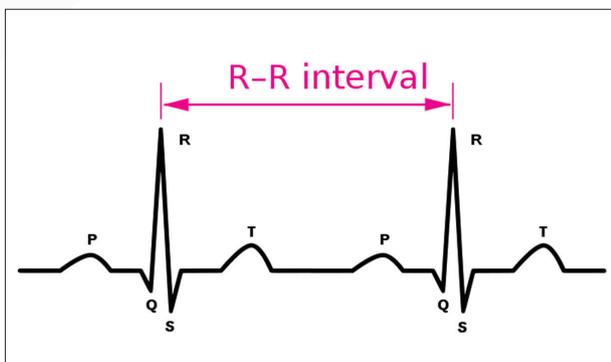


図-1 心電図 RR 間隔

後、横隔膜ペーシングによる陰圧換気中^{☆3}に右頸部迷走神経を電気刺激して、呼吸に連動した心拍変動を発生させた。迷走神経刺激は、呼気時 (RSA)、吸気時 (逆 RSA) の呼吸に同期した刺激、その刺激と同数の心拍を 1 分間に発生させる一定の刺激 (コントロール) の 3 つの条件で行った。

一回換気量、心拍出量、動脈血圧に変化はなかったが、RSA はコントロール時と比較して一回換気量に対する生理学的死腔^{☆4}の比 (Vd/Vt) と肺内シャント^{☆5}の割合 (Qsp/Qt) をそれぞれ 10% と 51% 減少させ、酸素消費量を 4% 増加させた。逆 RSA では Vd/Vt と Qsp/Qt がそれぞれ 14% と 64% 増加し、O₂ 消費量が 14% 減少した。

この結果は、RSA は肺のガス交換に有益で、「心拍の節約」によって肺循環のエネルギー効率を改善することを示唆しており、新たな発見であった。

生体は、安定した内部環境を一定に保とうとする働き (生体恒常性、ホメオスタシス) と、急性のストレスに対処する素早い身体反応で、状況に応じて変動しながら適応する (アロスタシス) の間でバランスを保っている。RSA は生体が休息モードにあることを示し、その振幅は休息の深さを反映する。RSA の振幅の増減から、生体がホメオスタシスに向かっているのかアロスタシスに向かっているのかを客観的に知ることができるのである。

研究の継承、そして発展

心臓の拍動間隔のゆらぎには、深いサイエンスが横たわっている。この論文の第一筆者でもある早野順一郎先生 (名古屋市立大学)、心電図自動解析アルゴリズムを開発した吉澤誠先生 (東北大学) は、

☆3 普段の私たちの呼吸は陰圧換気であり、自発呼吸の換気方法である。横隔膜・内肋間筋の収縮で胸腔内圧が陰圧になり、肺が膨らむ (経肺圧)。自発呼吸では呼吸努力が強い (=陰圧が強い) ほど、経肺圧が高くなり肺が大きく膨らむ。

☆4 呼吸器系のうちガス交換が行われない領域。

☆5 肺胞内のガスと肺胞毛細血管を流れる静脈血が接触せず、ガス交換をしないまま心臓に還流している状態。肺胞内で酸素化されず肺を通過する血液の比率がシャント割合。

日本の心拍変動解析研究の第一人者である。2人は偶然にも同じ1955年生まれで、長く日本の生体信号処理分野をリードしてきた。現在もなお、心拍変動解析は発展を続けている。筆者は、心源性脳梗塞や心臓突然死（致死的心室性不整脈）を早期にスクリーニングし、予防するための指標を構築する研究に従事している。健常者が突然亡くなる突然死の原因は、心筋梗塞、心筋症、心不全など心臓病によるものが6割超に及ぶ。一生体情報工学者として、心拍変動解析を通じて予期しない急死のリスクを下げていきたい。

この論文に示すように、私たちは心拍をコントロールすることはできず、コントロールできるもの

は「呼吸」である。深呼吸により気持ちを落ち着かせたり、集中することができる。「全集中！水の呼吸！」について語りた方、是非私たちの研究室を訪問ください。

(2021年12月22日受付)



湯田恵美（正会員）
emi.a.yuda@tohoku.ac.jp

東京都出身。筑波大学大学院修了，博士（工学）[新潟大学]。名古屋市立大学大学院医学研究科 NEDO プロジェクト研究員，東北大学大学院工学研究科 助教を経て，同大学データ駆動科学・AI教育研究センター 助教（現職）。生体信号処理，生体ビッグデータ解析に関する研究に従事。

