

論文内容要旨

Extraction of apex beat waveform from acoustic pulse wave by sound sensing system using stochastic resonance

(確率共鳴を用いた音響センシングシステムにより得られた音響脈波からの心尖拍動抽出)

Scientific Reports, 11: 13711, 2021.

主指導教員：吉栖 正生教授

(医系科学研究科 心臓血管生理医学)

副指導教員：高橋 信也教授

(医系科学研究科 外科学)

副指導教員：石田 万理准教授

(医系科学研究科 心臓血管生理医学)

藤田 悦則

(医歯薬保健学研究科 医歯薬学専攻)

はじめに

数十年前、心音と心雑音の聴診所見を客観化するために、心音図（Phonocardiogram : PCG）が用いられていた頃、心尖拍動（apex beat）を記録するために心尖拍動図（apex cardiogram : ACG）の記録が行われたが、記録技術の困難さもあり、広く使われるには至らなかった。

このたび非侵襲的に生体表面から生体脈波を採取するために、確率共鳴を用いた音響センシングシステム（Sound Sensing System using Stochastic Resonance : 4SR）を開発、0.5~80Hzの広帯域にわたって音響振動情報を得ることに成功し、それを Acoustic Pulse Wave（APW）と命名した。

方法

APW計測は座位姿勢で行い、4SRの検出ユニットは左第5肋間、左鎖骨中線上（V4付近）で胸部正中線から左10cmの胸部前面に配置した。PCG用マイクロフォンは心尖部に置いた。また、ECGはII誘導を取得した。

APWのバンドパス・フィルタ処理によって、より低音域のACG相当波形（Cardiac Apex Beat : CABと呼ぶ）と、それよりも周波数の高い心音相当波形（Cardiac Acoustic Sound : CASと呼ぶ）が得られた。CABとCASは、発生源と伝達経路が異なり、これら二つの振動が重畳したものがAPWである。

APWとPCGの各波形の周波数解析結果を関数化（APW関数、PCG関数）し、APW関数をPCG関数で割ると変曲点が生じる。この変曲点がCABとCASの振動成分が重畳する周波数帯域と考え、境界周波数（Boundary Frequency : BF）と定義した。

健常被験者70人の参加を得て、内50人でBFの決定とCABの定義と分類を行い、20人で検証を行った。50人は、20~60歳代の、男性39名と女性11名で、平均年齢38.2（±10.3）歳である。

CABの主観的波形分類は、心房収縮波（A波）と心室収縮期波（E波）に注目して行い、客観的波形分類はパワースペクトル密度（PSD）、Correlogram、短時間フーリエ変換（STFT）、フーリエ級数展開の正弦波と三角波、および全波整流波形の式の数学的解釈を用いた。

結果

BFを縦軸に、HRを横軸にとったBF・HR相関曲線は、 $y = 0.0173x^2 - 2.5847x + 107.6111$ （ $R^2 = 0.8242$ ）で表され、HRが75/minのときにBFは10Hz近傍で最小値となった。

前胸部で得られたAPW由来のCABは、ACGで得られる心尖拍動波に極めて類似していた。前胸部のCABは、振幅に注目するPSDによって、疑似正弦波（S波）と疑似三角波群（T波、C波、G波）、および疑似全波整流波（R波）に分けられ、周期性に注目するCorrelogramからは正弦波の基本周期を持つS波とG波に分類され、高調波が顕在化するT波、C波、R波に分類された。

さらに、ラグに対する自己相関関数の差に注目すると、

Correlogramの+側で、S波とG波が区別でき、

Correlogramの-側で、T波、C波が区別でき

多峰性を示すノッチでの R 波が区別できた。

S 波と G 波は、視診・触診で言われている sustained、T 波、C 波、R 波は tapping に対応するものと考えられる。振幅と位相に注目する STFT では、これらフーリエ級数展開を利用した波形分類によって、S 波、T 波、C 波、G 波、R 波は、正常な波形のバリエーションとして分類することができた。

考察

BF が心拍数の 2 次関数で近似されることにより、PCG を用いずに APW から得られる心拍数のデータのみで、リアルタイムに BF を決定することが可能になった。心拍変動が生じたときに BF が BF-HR 相関図の回帰曲線上を移動するため、心臓の運動分析と圧力脈動・心臓の運動状態および心室血行動態が評価できる可能性が示唆された。例えば、安静状態で心拍数が 70~80/min で、BF が 10Hz 付近にある場合、HRV のゆらぎが $1/f$ となり、効率的な運動を心臓が行っていることが示唆された。

結語

APW・CAB・CAS のリアルタイム計測により、臨床的意義のある音振動・圧力情報が加わり、機械の故障診断に用いられてきた工学的アプローチの健康診断への適用の可能性が生まれ、また APW を計測する 4 SR システムは長期にわたり繰り返し非侵襲的に生体情報を取得することができる Physical diagnostic tool となり、AI を使用した分析を含め広範な応用が期待される。