

## [研究助成 (A)]

## ウェアラブル腸音計測・解析システムの開発

## Wearable Bowel Sound Measurement/ Analysis System

2191011



研究代表者

東京理科大学  
工学部 電気工学科

教授 阪田 治

## [研究の目的]

長時間腸音モニタリングシステムは、小腸の消化活動における運動（蠕動運動等）の活性度を長時間連続のかつリアルタイムに定量評価することが可能である。これまでにいくつもの臨床研究が行われ、その有効性が確認されてきたが、適用範囲は集中治療室や手術室の不動かつ意識のない患者に限られていた。これは装置の仕様・性能に起因するものであり、被計測対象が体動を起こす場合には長時間連続の安定的な高精度測定ができない。そこで、本研究では、長時間腸音モニタリングの適用範囲を、日常生活レベルで動き回る人にまで広げるための技術研究開発に取り組む。具体的には、ウェアラブルシステムとするためのセンサデバイスの開発および強ノイズ下における高精度の腸音検出技術の開発である。本稿ではその要素技術研究について紹介する。

## [研究の内容, 成果]

## 1. 新しい腸音センサデバイスのための要素技術研究

一般に臨床現場で行われている腹部聴診では、空気伝導式の聴診器や伝音管を用いない電子聴診器が使用される。いずれのものも、腹腔内で発生して体表面まで伝わった振動が体表皮膚を

振動板として空気を振動させて可聴音とし、それを直接人間の鼓膜またはマイクロフォンで捉えるものである。現在の医療現場における用途では、そのような簡単なつくりの器具で十分な聴診を行うことができる。しかし、我々が目指すものは長時間の連続的な聴診であり、まず人力で腹部に聴診ヘッドを当て続ける聴診または録音を長時間行うことは不可能である。それでも、被計測対象が動かずに安静状態であれば、聴診ヘッドを腹部表面に強力に貼付し続けることで長時間の聴診を可能にできる。従来型の長時間腸音モニタリングシステムはそのような仕様である。しかし我々は、完全に不動の患者のみを被計測対象とせず、ベッドで起き上がり、院内さらには屋外を動き回る患者に対する長時間連続聴診の実現を目指しているため、従来型の聴診ヘッドを貼付しつづけるという方式ではその要求を満足することはできない。そこで、本研究では、長時間にわたって腹部表面に確実に装着可能で、かつ様々な種類のノイズ混入に対して頑強なセンサデバイスの仕組みについて検討を行った。腸音検出システムの多くは、音響用マイクを使用している。音響用マイクはどうしても雑音の影響を受けるため、我々は圧電素子を使ってこの弱点を補うシステムを提案する(図1)。まず下腹部を覆う程度の振動板を下腹部に貼り、その表面上に3つの小型マイクと圧電素子を貼る。

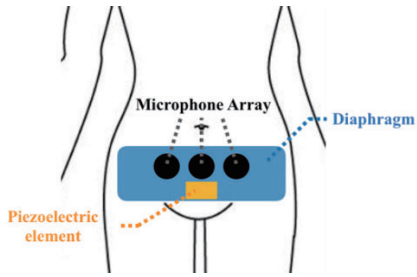


図1 ハイブリッド型腸音センサの概念図

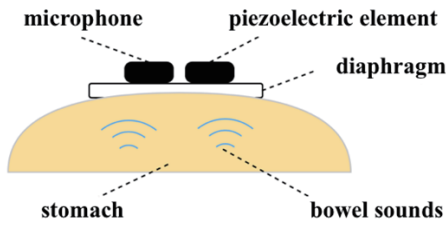


図2 提案デバイスの模式図

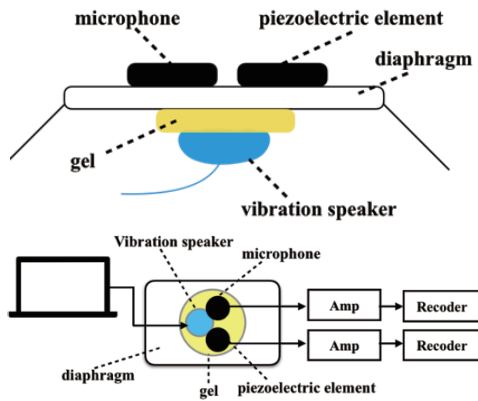


図3 ハイブリッド型腸音センサ実験模式図

腸音は小腸のどこで発生するか予測がしにくい(音源がランダムに現れる)。従って、いくつかのマイクで集音することで、取りこぼしなく腸音の計測が可能となる。圧電素子は振動板の表面上に1つ添付して計測する。

図1の断面図を示したものが図2である。小腸内のどこかで腸音がランダムに発生して、それが体表面に伝わる。体表面上に貼った振動板は、その振動を取りこぼしなく捉える役割を担う。それをマイクと圧電素子のそれぞれで記録する。

これを模擬した実験装置を図3のように組んだ。小型マイクと圧電素子を用いて腸音を同時に計測した。今回は、実際に人間の腸音を計測

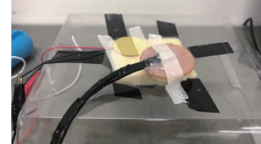
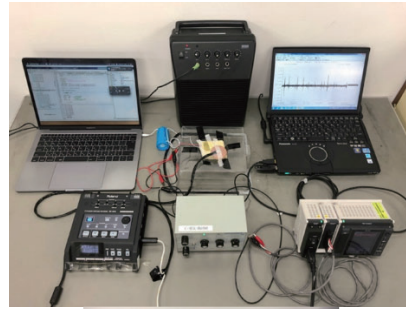
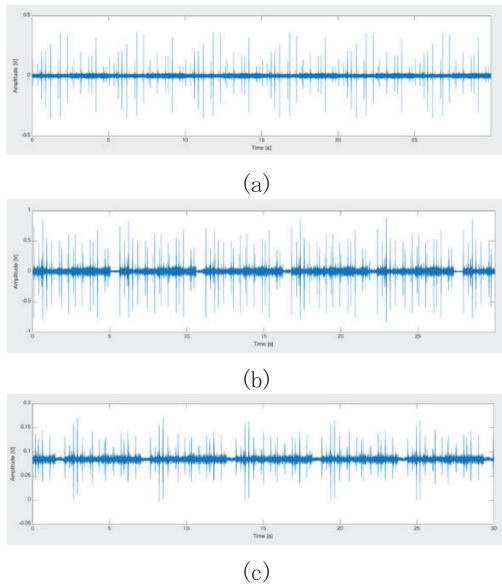


図4 ハイブリッド型腸音センサ実験システム

する状態を再現するために、人の肌のように柔らかくて厚いゲル(人肌ゲル<sup>®</sup>)を音源とプラスチック板の間に挟んだ。実際の実験システム構成も図4に示す。PCから腸音のテンプレートを30秒間再生して、マイクと圧電素子で計測する。腸音は非常に小さい音であるため、アンプで信号を増幅させてからレコーダーで記録する。腸音の計測は極めて静かな部屋で行う。計測装置の横には、雑音を発生して混入させるための大型スピーカーを設置した。

測定装置の横に置いた大型スピーカーで病院内(ベッドサイド)の環境雑音を再生しながら、図5(a)の音データを振動スピーカーで再生する。そしてマイクと圧電素子で計測した腸音信号波形を図5に示す。これより、概ね腸音信号をよく記録できていることがわかるが、同時にマイクと圧電素子ともに雑音を拾っている。これが腸音測定精度にどの程度影響を与えるのかを調べるために、両素子の腸音検出数の違いを調べた。30秒あたりの腸音検出回数を算出した結果を表1に示す。

図5の信号における腸音検出回数は70[回/30秒]であった。これを基準に両素子による計測信号中の腸音検出回数を比較し、相対誤差を求めた。まず、大スピーカーからのノイズ音量をゼロとした際の腸音検出回数は、ともに58[回/30秒]であり、相対誤差は17.1[%]であった。次に、ノイズ混入ありの場合の計測信号を



(a) 振動スピーカ-の出力波形  
 (b) シリコンマイクロフォンの計測波形  
 (c) 圧電素子（ピエゾフィルム）の計測波形

図5 腸音波形

表1 マイクロフォンとピエゾフィルムの腸音検出数の差異

		Mic	Piezo	Template sound
Quiet environment	Number of detections [times/30 s]	58	58	70
	Relative error [%]	17.1	17.1	—
Noisy environment	Number of detections [times/30 s]	41	56	70
	Relative error [%]	41.4	20.0	—

解析すると、マイクで計測した信号の腸音検出回数は41 [回/30秒]であり、相対誤差は41.1 [%]であった。圧電素子で計測した信号の腸音検出回数は56 [回/30秒]であり、相対誤差は20.0 [%]であった。これより、騒音環境では圧電素子よりもマイクの方が腸音計測精度が劣化することが言える。しかしながら、マイクロフォンとピエゾフィルムは、それぞれ検出可能な腸音が一致しているわけではなく、片方が検出できた腸音であってももう一方では検出できていないものが存在する。つまり、両素子の少なくともいずれか一方で検出が可能であればよいとすることにより、検出精度を向上させることができる。さらに、両素子はそれぞれ耐性をもつノイズの種類が大きくことなるため、体動や環境雑音といった全く異なる種類のノイズに

曝されるウェアラブル使用において効果を発揮するものと思われる。

## 2. 着衣下の腸音計測におけるノイズ対策

腸音計測におけるノイズ対策については過去に多くの試みが行われてきたが、それらはいずれも安静状態かつ短時間計測を前提とするものであった。我々は、この2条件がともに成立していない腸音計測である、ウェアラブル式の腸音計測システムの開発を目指している。そのため、体に常時装着して音響信号計測をする際にセンサに混入するあらゆる種類のノイズへの対策を考えなければならない。

実験は、図6のように腹部2か所にマイクロフォン式の従来型腸音センサを装着し、その上に3種類の着衣（図7）をしながら採音を行った。なお、腸音検出の基本的な流れは我々の先行研究で提案した図8の方法とし、本研究では図8中のDenoisingの部分で工夫を加えた。

図6左において、腸音マイクを腹部表面から離れた状態で服の擦れ音のみを記録した波形を図9下に示す。一方、着衣無しの状態（図6右）で記録した腸音波形を図9上に示す。

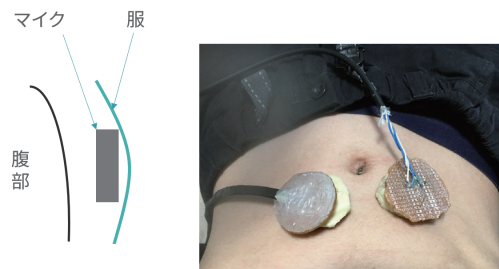


図6 着衣腸音計測の様子



（左：ポリエステル65%、レーヨン35%、中：綿100%、右：ポリエステル66%、綿34%）

図7 実験に使用した衣服

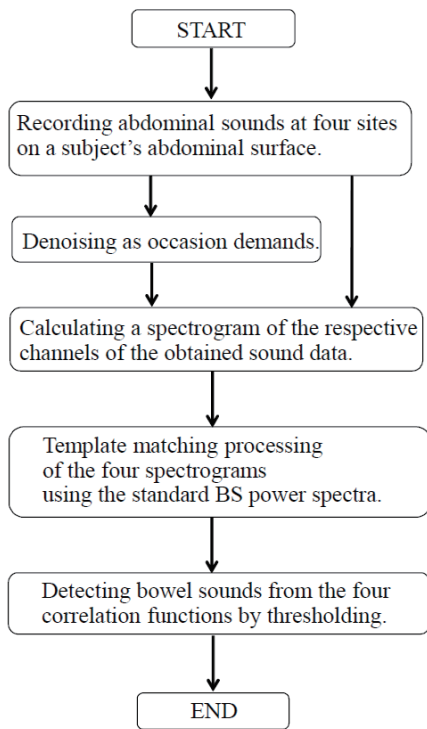


図8 基本的な腸音検出処理の流れ

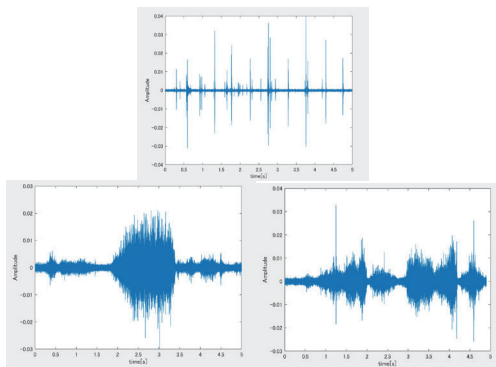


図9 腸音波形および服の擦れ音波形の2例

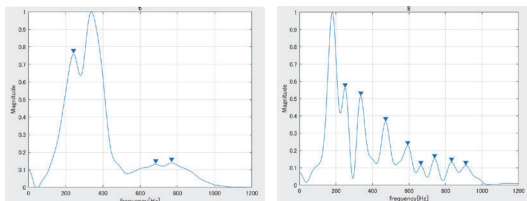


図10 腸音と服擦れ音のスペクトル形状特徴の違い

実験用音響データとして、図9, 10に示す腸音波形と服擦れ音波形を重畳させた信号波形を生成した(図11)。

腸音検出処理における服擦れ音対策として、次の方法を提案した。

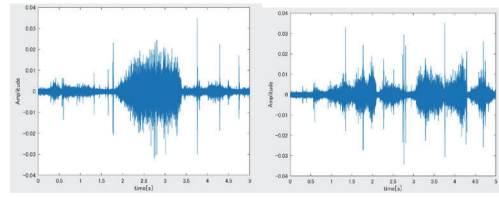
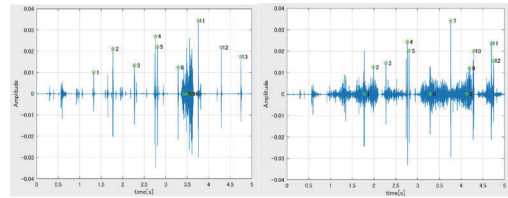


図11 服擦れ音を重畳させた腸音波形2例



(左: 腸音とノイズの重なりが小さい例, 右: 腸音とノイズの重なりが大きい例)

図12 提案法による腸音検出例

- ① ノッチフィルタによる狭帯域ノイズ除去
- ② ローパスフィルタによる重低音除去
- ③ ウェーブレットによる周波数フィルタ
- ④ 周波数スペクトル上の形状特徴に基づく腸音と服擦れ音の区別

①②については、常に腸音検出精度を下げることはないため、問題なく実施する。③については、ドベシのマザーウェーブレットによる多重解像度フィルタで、ユニバーサル閾値採用し、周波数分解レベルを14まで展開した。④は、さらに2段階に分かれる。腸音のスペクトルが高々2, 3個のピークを持つのに対して、服擦れ音はその倍以上のピークを持つ。

また、腸音が200 Hz付近と600 Hz付近の両方またはいずれかに比較的大きな独立ピークを持ちやすいのに対して、服擦れ音はそのような特徴を有しないことを利用した区別を行う。

①～④のルールによる腸音検出結果例を図12に示す。服擦れ音が混入していても腸音が検出できている(図中緑▽印)。

#### [今後の研究の方向, 課題]

本プロジェクトでは、ウェアラブル長時間腸音モニタリングシステムのための要素技術につ

いて基礎研究を実施したが、腸音検出のためのノイズ採択ソフトウェアについては好ましい結果が得られているものの、採音センサデバイスについては、まだ実用を見込めるだけの成果が得られなかった。しかし、本年3月の研究期間終了後にも継続的に研究を進めており、本報告で紹介した結果よりも数倍～数十倍の精度の基礎技術開発の見通しが立ってきたところである。ソフトウェア研究とともに実用化までもっていききたい。

[成果の発表, 論文等]

- [1] Yoshiyuki Yamada, Osamu Sakata, Yasuyuki Satoh, Hybrid Bowel Sound Measurement System Combining Microphones and a Vibration Sensor. Proc. The 9th International Conference on Intelligent Computing and Applications, pp. 175-179, 2020.