

# AIを用いた胎児と母親の機能を遠隔評価する支援システムの開発

代表研究者	吉田好雄	福井大学	医学部産科婦人科学教室	教授
共同研究者	折坂誠	福井大学	医学部産科婦人科学教室	講師
共同研究者	玉村千代	福井大学	医学部産科婦人科学教室	助教
共同研究者	荒木睦大	福井大学	医学部産科婦人科学教室	客員教授
共同研究者	森幹男	福井大学	工学研究科	准教授
共同研究者	浅井竜哉	福井大学	工学研究科	准教授

## 1 あらまし

遠隔地の妊婦が、自宅で市販の心音計などを用いて胎児心拍数や陣痛圧データを計測し、それらのデータをクラウド経由で病院施設に送信すると、病院の産科医がその波形データを監視・解析することで、胎児の健康状態（胎児機能）をふるい分けし、妊婦が受診する適切なタイミングを判断するための、サポートシステムを構築することが望まれている。本研究では、市販の計測器を用いて計測された表示画像データを、OCRを用いて解読する方法を検討すること、これらの胎児心拍データから、胎児の健康状態を評価支援するプログラムを開発すること、胎児の心拍数変動時系列データを多変量多重度マルコフモデルを用いて時系列解析する方法を検討しその有効性を実験結果を用いて定量的に評価する。

## 2 はじめに

### 2-1 開発の目的と背景

現在、産科医療の現場では胎児の健康状態（胎児機能）を診断・評価する際に、胎児心拍数の変動パターンを監視する分娩監視装置が広く用いられており、従来、胎児の死亡率の減少に大きく寄与してきた。

しかし、遠隔地や多雪地域に居住する妊婦が産科施設へ頻回に通院することは、様々な負担を伴うものである。さらに、地方では産科施設の集約化・減少が進行し、子どもを産み育てる環境が徐々に失われており、人口減少の要因の一つになっている。

そのため、自宅からでも母親及び胎児の健康状態を評価・診断できる評価支援システムの実現が求められている。例えば、母親が容易に扱える市販の安価な測定機器を用いて、自宅から胎児心拍数データを送信し、産科医がその波形データを解析することで、医師が胎児の健康状態（胎児機能）をふるい分け（スクリーニング）検査し、妊婦がどのタイミングで受診すべきかアドバイスできる胎児機能の遠隔評価サポートシステムが期待されている。

そのため、自宅からでも母親及び胎児の健康状態を評価・診断できる評価支援システムの実現が求められている。例えば、母親が容易に扱える市販の安価な測定機器を用いて、自宅から胎児心拍数データを送信し、産科医がその波形データを解析することで、医師が胎児の健康状態（胎児機能）をふるい分け（スクリーニング）検査し、妊婦がどのタイミングで受診すべきかアドバイスできる胎児機能の遠隔評価サポートシステムが期待されている。

従来、遠隔評価を行うために母親が遠隔地で携帯用の専用の小型胎児モニター（病院が有料で貸し出し）を用いて計測し、電話回線を用いて接続された情報を病院側の分娩監視装置上で受信し、表示された心拍情報を基に医師が従来と同様な方法で診断する方法がある[1]-[3]。

さらに、病院側での医師の作業・判断等を支援する機能を人工的に実現するためには学習機能が必要となる。このような学習機能としては最近のディープラーニング(深層学習)があるが、実際に行うには同規模の正常なデータと異常なデータが必要となる。一般的に医療の分野で異常な胎児のデータを大量に入手して学習させることは個人情報保護の観点から難しい[8]。

そこで健康な胎児の心拍変動データだけを用いて健康状態を学習し、胎児の異常状態を検出方法として、マルコフモデルを用いた統計的な学習機能が知られている。例えば、隠れマルコフモデルを用いた音声認識研究[5]や、日本語音節のマルコフ連鎖モデルを日本語音声認識候補の絞り込みに応用した研究[6]、日本語文の誤り文字を、m重マルコフ連鎖モデルを用いて、誤り位置、誤り長、誤り種別（誤字、誤挿入、脱落誤り）を検出する技術が知られている[7]。

### 2-2 問題点と解決法

文献[7]によれば、日本語文において誤った文字列が存在する（誤字・脱落・挿入誤り）場合、前後の文字間の接続強度が低下することに着目して、これらの誤りを高精度に検出できることが知られている。

このような文字間の接続強度の学習法を、心拍変動の状態遷移に適用することを考案した。すなわち、産科医師が標準的に定められた診断法[?]に従って、「健康」と判断した胎児の心拍変動データを「正常」な状態遷移と見做して学習

する（教師あり学習に相当）ことにより、「正常」以外の状態遷移を検出できると期待できる。これは「正常」な状態遷移（心拍変動データ）だけを学習して辞書を構築できれば（辞書内の正常な状態遷移の頻度カーブが飽和する）、その辞書を用いて入力の検査対象の状態遷移が「正常」か否かを判断することができる。

すなわち、マルコフモデルを母親及び胎児の状態遷移に適用し、母親及び胎児の状態遷移から異常の可能性のある状態遷移の箇所を指摘することにより、医師がこれらの情報を参考に最終的に胎児の健康状態を総合的に判断するもので、あくまでも医師を支援するシステムである。

本研究では、正常な胎児と母親の心拍変動計測データを取得し、広く知られている周波数領域の解析法[10]により、多変数多重度マルコフ連鎖確率モデルを用いて学習法を提案し、胎児の健康状態を評価する方法を提案する。また、乱数により擬似的に生成された状態遷移の異常データを用いて、構築された学習辞書データの品質（適合性と再現性）を評価する実験結果を議論する。

### 3. 胎児機能の遠隔スクリーニング検査支援システムの概要

ここでは、これまでに発表された特許[添付資料1]、論文[添付資料2]で示された胎児機能の遠隔スクリーニング検査支援システムの概要を述べる（詳細は添付資料1、2を参照）。

分娩監視装置による胎児の健康状態の診断基準は、日本産科婦人科学会により「産婦人科診療ガイドライン－産科編 2017」の分娩監視法において明確に定められており、医師や看護師が胎児の健康状態を正確にレベル1（正常波形）からレベル5（異常波形・高度）の5段階で診断できる診療体制が確立されている。

ここでは遠隔スクリーニング検査支援システムの構築から運用に至るまでの工程を次の4フェーズに区分してその概要を述べる。

【フェーズ1】：「医師による健康状態の診断と正常データの振るい分け過程」、産科医療現場において、病院の設備を用いて検査し、産科ガイドラインに従って医師が胎児の健康状態を5段階評価（レベル1～レベル5）する。

ここで、レベル1及びレベル2の心拍情報が「正常」な心拍情報として扱われ、これら的心拍情報は、フェーズ2において学習用に用いられる。

【フェーズ2】：「多変数多重度マルコフ連鎖確率モデルを用いた正常データの辞書構築過程」、健康状態がレベル1又はレベル2と診断された胎児と母親の心拍データを用いて学習しマルコフ連鎖確率辞書を作成する。

【フェーズ3】：「正常なデータの値を、擬似的に乱数を用いて異常な値に変更して異常データを生成し、3000件以上の擬似的異常データに対して95%以上の精度で検出する品質レベル」。

【フェーズ4】：「本システムの構築法と運用の基本方針」、各産科病院において、品櫃試験に合格した標準マルコフ辞書を購入して、検査対象の入力でデータを状態解析して標準辞書にアクセスする判定機能を実現して「遠隔からのスクリーニング検査支援システム」を構築する。

### 4. 遠隔実験、市販胎児心拍計数及び陣痛圧値の動画像データのOCR自動読み取り実験

過疎地や多雪地帯に住む妊婦さんが、自宅に居て胎児の健康状態を確認できるようにするための胎児機能の遠隔評価サポートシステムのイメージを図1に示す。

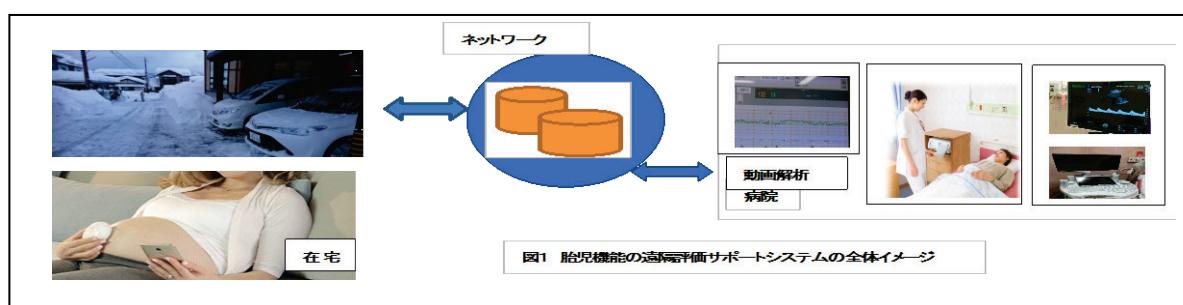


図1 胎児機能の遠隔評価サポートシステムのイメージ

## <基本的な処理法>

- (1) 胎児心音計に画面表示される心拍数の数値を、在宅でブレなく動画撮像できる仕組みを作成する。動画データをクラウド上へ送信するにあたり、画像解析（数値読み取り）精度が低下しない範囲内で、ファイルサイズの最小化を目指す。
- (2) 受信したデータファイルから動画を1フレームずつ読み込み、表示された胎児心拍数の数値をOCR（光学的読取器）の原理で読み取る。その際、既存の「Pythonを使って固定視点画像からデジタル数字を抽出するプログラム」を参考に、本研究の目的に即したプログラムを開発する。読み込んだ胎児心拍数の数値データを、逐次CSVファイルに出力・保存する。以上の画像解析プログラムを、深層学習プログラミングに最適な数値解析ソフトウェアMATLABを用いて構築する（図2～図4）。
- (3) CSV形式で出力された1拍毎に変動する胎児心拍数の数値を、折れ線グラフ化することで、モニター上に胎児心拍数波形を作成する。この波形が胎児機能評価のスクリーニングに資するか、従来法の分娩監視装置で得られた胎児心拍数波形と比較しながら検討する。

```

20/09/28 11:01 C:\Users\yarak\Documents\MATLAB\...\DSC_0724_recog_1.m 1 / 1

% 画像の読み込み
% I=imread('DSC_0724.jpg');
I=imread('DSC_0725.jpg');
imshow(I);
% roiの指定 (左上を起点とした[x y width height]を1行に持つMX4の行列)
% 下記はdrawrectangleにて適当に決定したroi
roi=drawrectangle
roi=drawrectangle
%
%roi = [2283 455 179 90;2290 1441 184 98]; % 'DSC_0724.jpg' の場合
roi = [2261 410 177 81;2261 1289 195 105]; % 'DSC_0725.jpg' の場合
% 'CharacterSet' にて数字のみ認識するように指定
txts= ocr(I, roi, 'CharacterSet', '0123456789');
% ocrの読み取り結果出力
txts(1).Words
str2double(txts(1).Words) % roi1で指定された数字出力
%
txts(2).Words
str2double(txts(2).Words) % roi2で指定された数字出力

```

図2 OCRを用いた文字読み取り法—静止画像の中で数値領域を指定する方法（赤字枠）

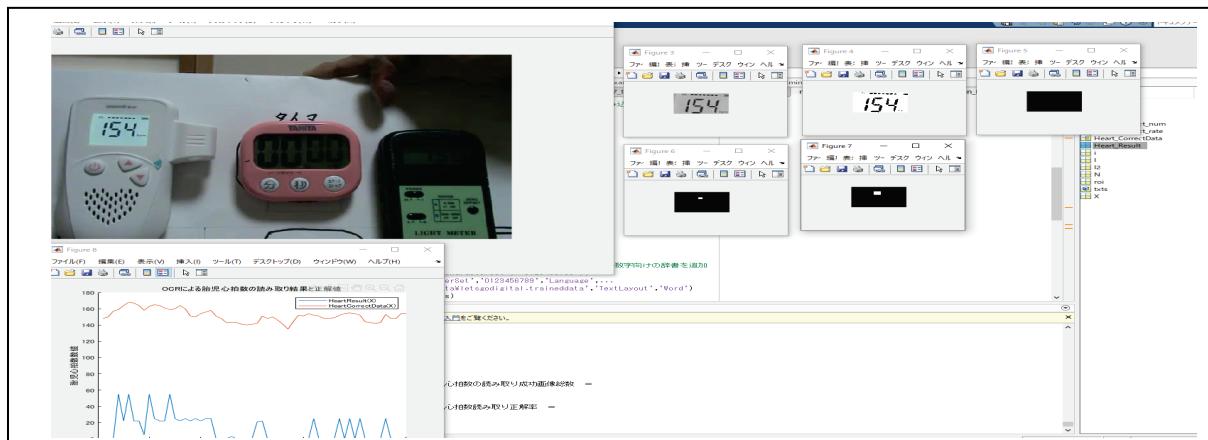


図3 OCR（光学的読取）を用いた数字読み取りプログラム（matlab）の例

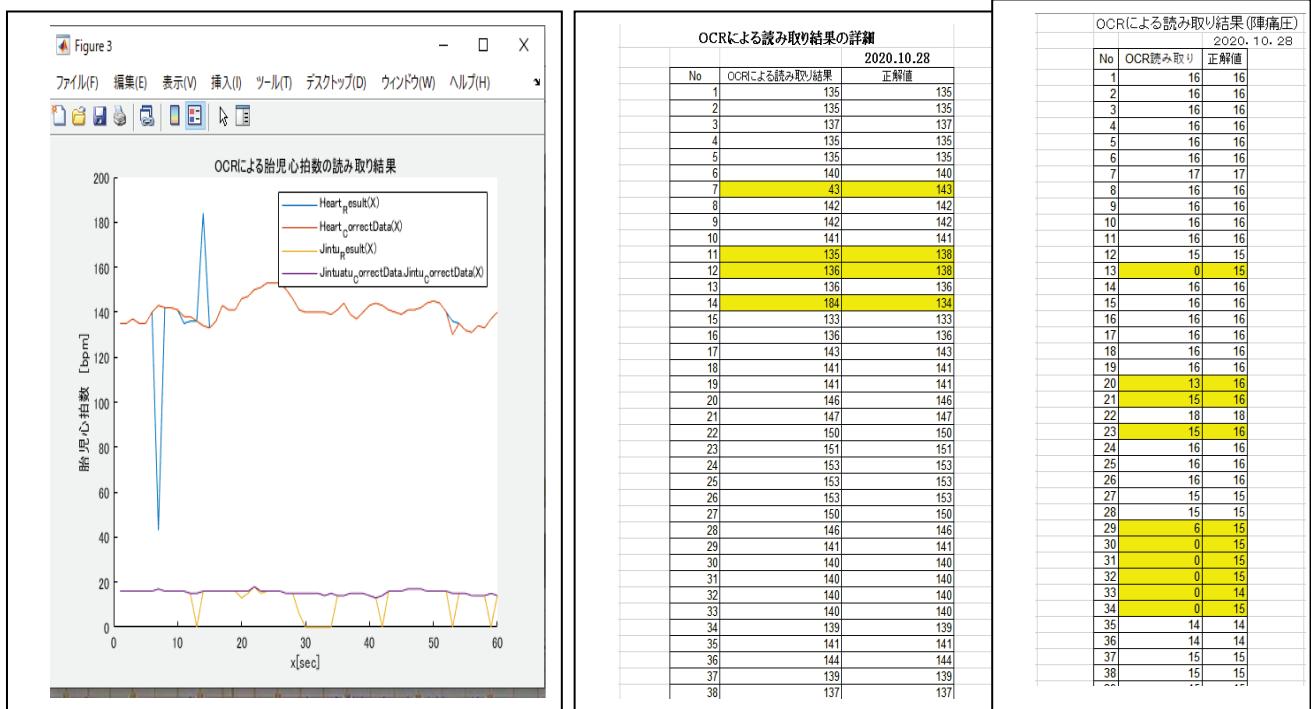


図4 OCRによる心拍数及び陣痛圧表示数値の読み取り結果例

## 5. 正常な胎児と母親の心拍変動計測データの解析と多変数多重度マルコフ連鎖確率モデルを用いた学習

### 5-1 外国のおとんデータを用いた正常・異常CTGデータ(FH・UC)の基礎特性

ここでの目的は、大量の正常データ（外国人を対象に収集された CTG の非営利の公開データベースを基に正常タイプの AI 辞書を構築することにある。構築された AI 辞書に関して、慶應義塾大らの先行技術の AI 辞書との間の性能を比較し、先行技術の性能よりも優位なもの実現を目指す。本研究の意義は、先行技術の AI 辞書（同数の正常データと異常データに依存）とは異なり、大量の正常データを基盤とした新しいタイプの AI 辞書の基盤が確立できることである。慶應義塾大のグループの先行技術の AI 辞書（これも同一の公開データ（注＊）を用いて作成）との性能の違いを、同一の対照の下で、公平に比較できる。慶應義塾大らの先行技術にならって、ゴールデンスタンダード [\*]を利用して、特許出願した AI 辞書を改良（いわゆる学習）する。 [\*] PhysioNet (米国) が非営利で公開しているデータベース「CTU-CHB Intrapartum Cardiotocography Database」 (<https://physionet.org/content/ctu-uhb-ctgdb/1.0.0/>) による。ブルノ大学病院 (チェコ共和国) とチェコ工科大学 (同国) にて収集されて、匿名化された CTG [Chudacek ら、Childbirth 誌、14 卷 (2014 年) ; Romagnoli ら、Data in Brief 誌、31 卷 (2020 年)]

図2.1 の方法によって、matlab の環境上で、CTU-UHB CTG データベースから Data を読み取り、正常な CTG (354 件) と異常なデータ (198 件) をダウンロードし解析した。

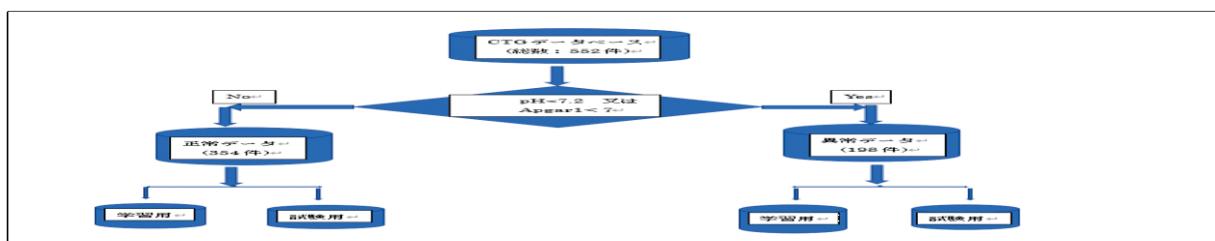


図2.1 CTU-UHB CTG データベースからData を読み取り、多変数多重度マルコフ連鎖確率モデルを用いて実施するマルコフ連鎖確率辞書の構築法

ここで異常とは、PH 値が 7.2 より小さい値を示す、低酸素状態の胎児を指すものである。正常な健康状態の CTG(心拍数変動 (FHR) と陣痛圧図 (UC) の例と PH 値が 7.2 より小さい (健康状態が不良、異常と呼ぶ) な胎児の CTG(心拍数変動 (FHR) と陣痛圧図 (UC) の例を図 2.2-1 と図 2.2-2 に示す。

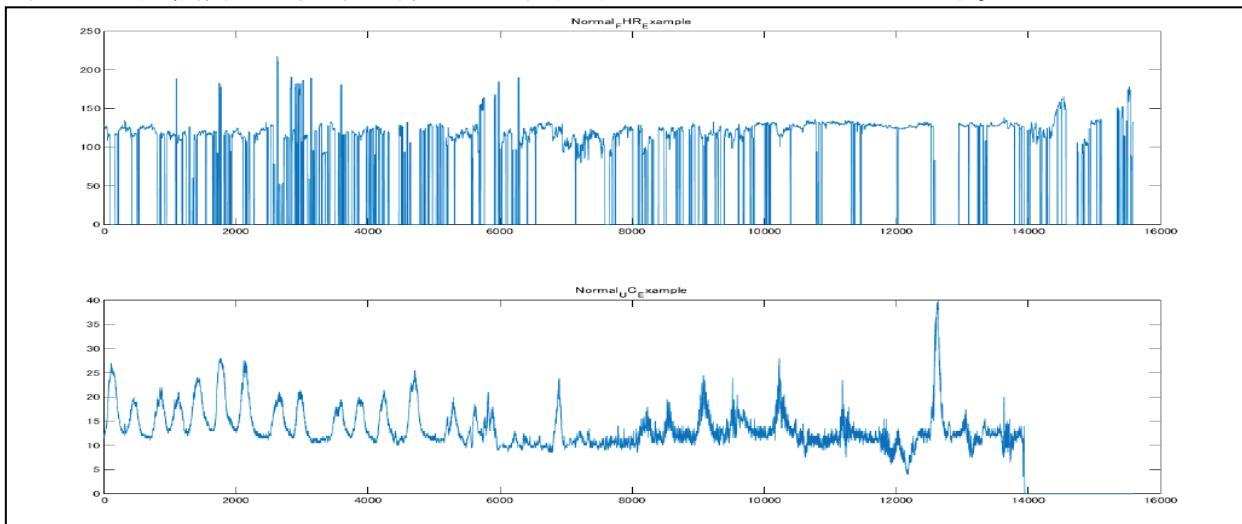


図 2.2-1 上図：正常な胎児の心拍数変動（横軸：時間、縦軸：一分間当たりの心拍数）  
と下図：陣痛圧図

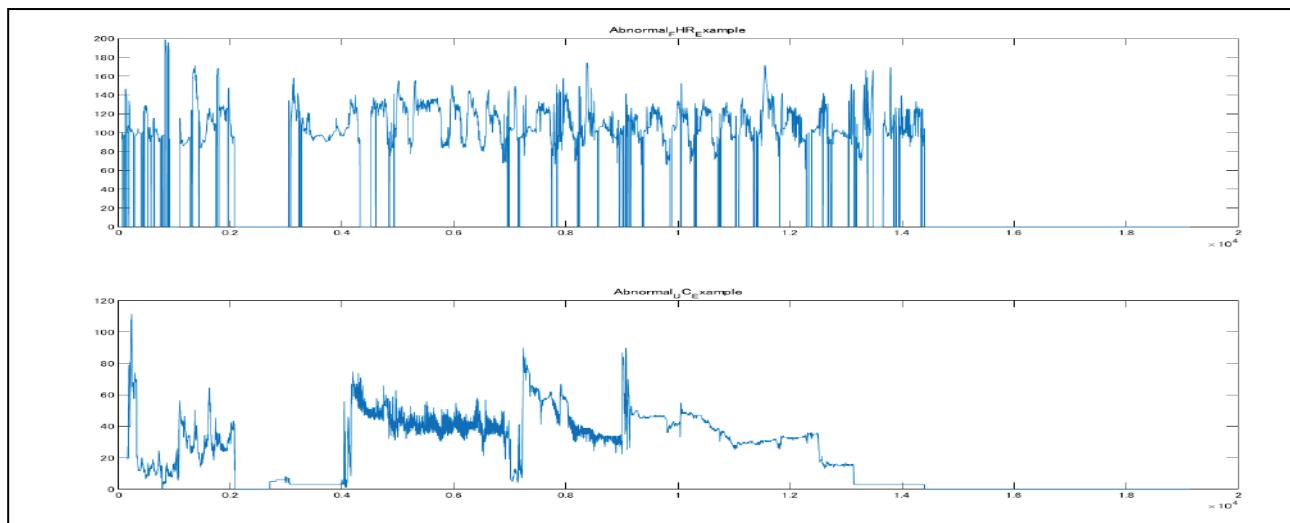
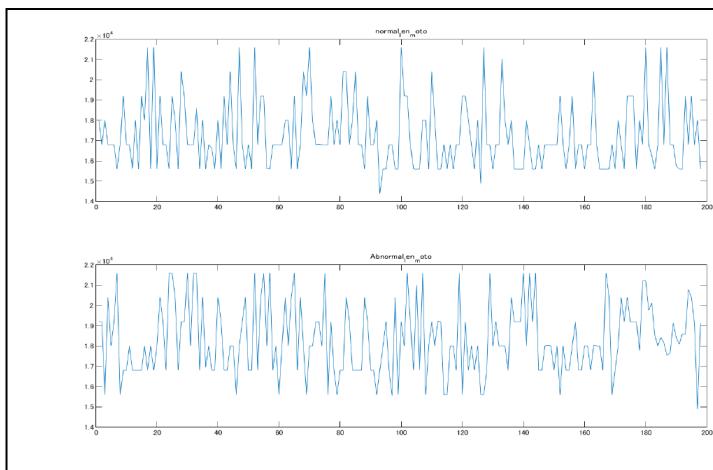


図 2.2-2 上図：異常な胎児の心拍数変動（横軸：時間、縦軸：一分間当たりの心拍数）  
と下図：陣痛圧図

## 5-2 CTG のデータの基本的な性質

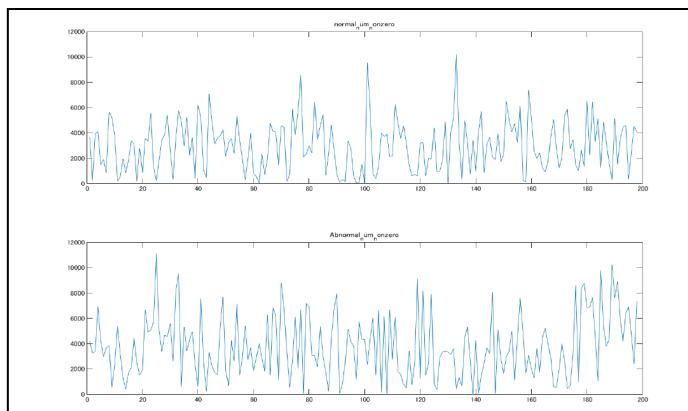
- (1) データベースにある正常な CTG の胎児心拍数 (FHR) と、異常な胎児の心拍数 (FHR) の平均長、分散、標準偏差を図 2.3 に示す。



元のFHR長さ			
	正常	異常	備考
平均	17,285	18,323	
分散	2,864,700	3,081,100	
標準偏差	1692.5	1755.3	

図 2.3 正常な胎児の CTG (上図) と異常な胎児の CTG (下図) の平均

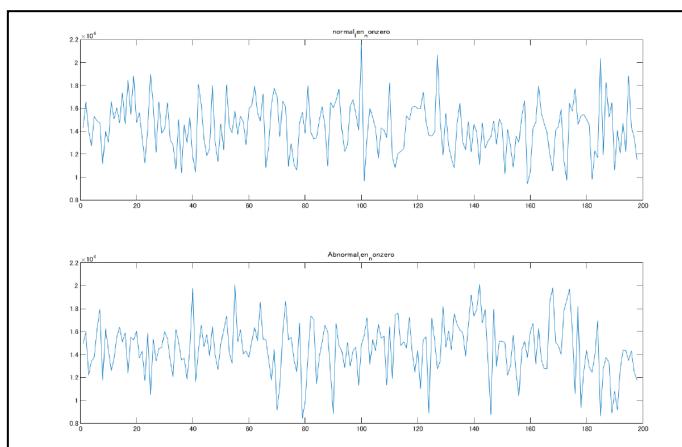
(2) 正常な FHR の異常な FHR のゼロ (心拍数がゼロ) の個数の平均値、分散、標準偏差を図 2.4 に示す。



FHRのゼロ位置の個数			
	正常	異常	備考
平均	2,961	3,786	
分散	4,043,300	6,248,600	
標準偏差	2010.8	2499.7	

図 2.4 正常な FHR の異常な FHR のゼロ (心拍数がゼロ) 位置の個数の平均値

②で示した FHR のゼロ位置を削除した後の比ゼロ位置個数の平均値、標準偏差を図 2.5 に示す。



FHRの非ゼロ位置の個数			
	正常	異常	備考
平均	14,324	14,536	
分散	5,240,500	5,658,800	
標準偏差	2288.9	2378.6	

図 2.5 正常な FHR の異常な FHR の非ゼロ位置（心拍数がゼロの位置を削除）の個数の平均値

CTG に含まれる二種類の FHR データと UC データは葬儀に相関性があり、産科医師は二つの FHR と UC を見比べて、胎児の健康状態を判断する。日本産科婦人学会からは出版されている、「産婦人科診療ガイドライン—産科編」の胎児の 5 段階レベル（第一段階は健康状態で、第五段階は異常状態）である（文献 6]）。

### (3) 1 CTG 当たりの FHR と UC の相互相関関数の変動例

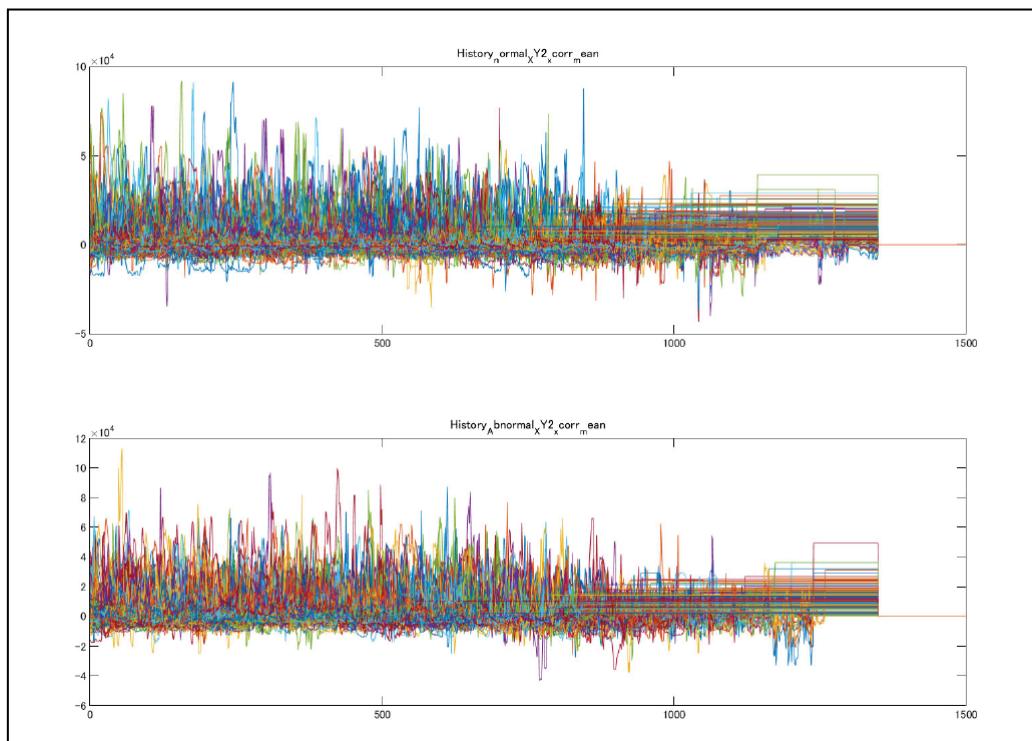


図 2.6 FHRUC の相互相関関数の例（上図：正常、下図：異常）

(4) 相互相関関数の標準偏差(WS16 の場合)

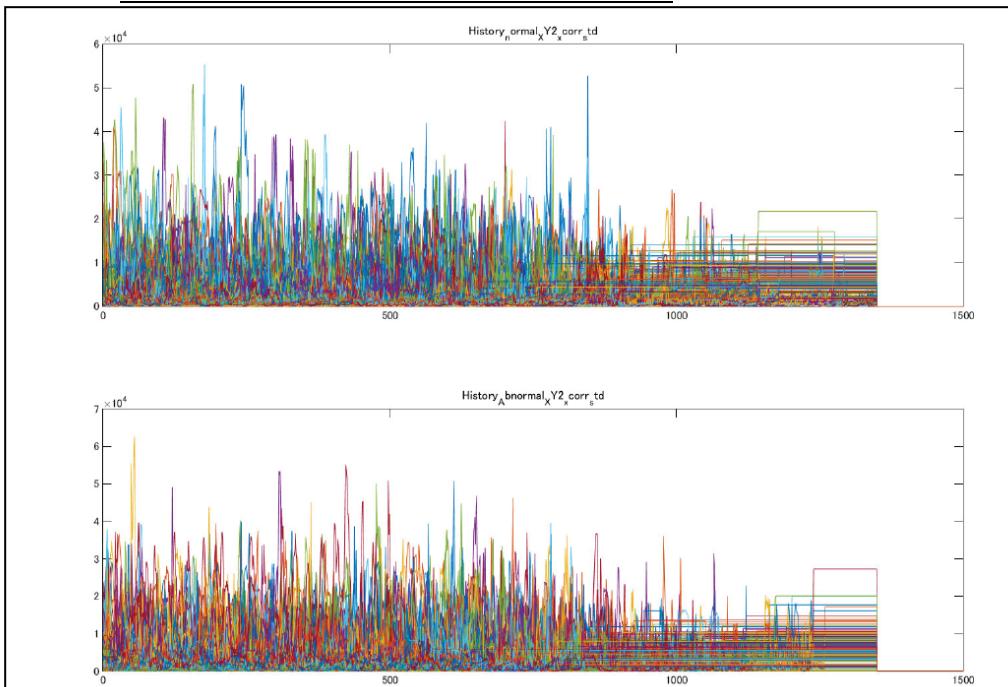


図 2.7 相互相関関数の標準偏差(WS16 の場合)

(5) 1個当たりの CTG (FHR と UC) の相関係数の平均

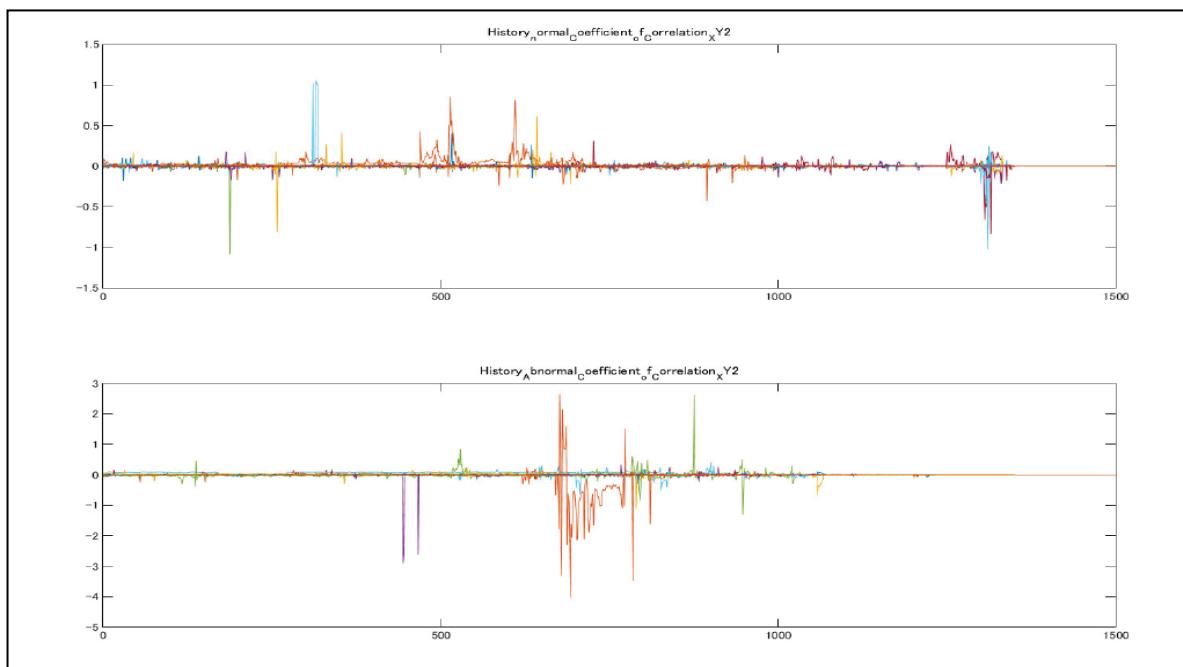


図 2.8 1個当たりの CTG (FHR と UC) の相関係数の平均例 (上図 : 正常、下図 : 異常)

(6) 198 個分の相関係数の平均

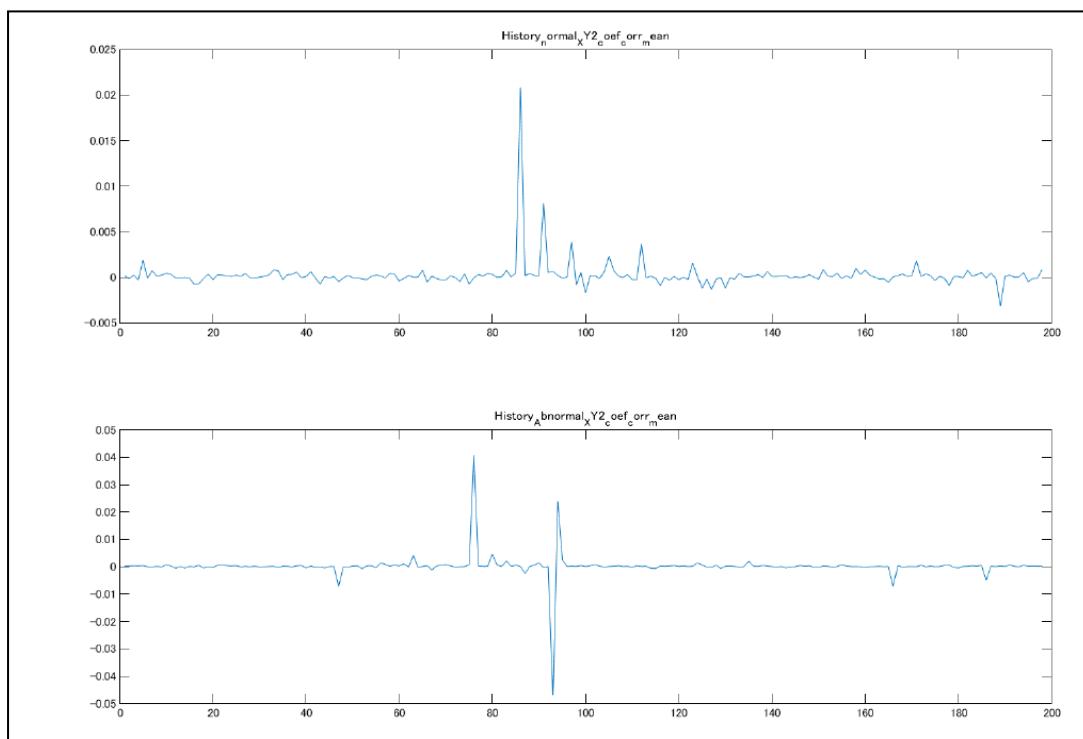


図 2.10 198 個分の相関係数の平均（上図：正常、下図：異常）

#### (7) 198 個分の相関係数の平均

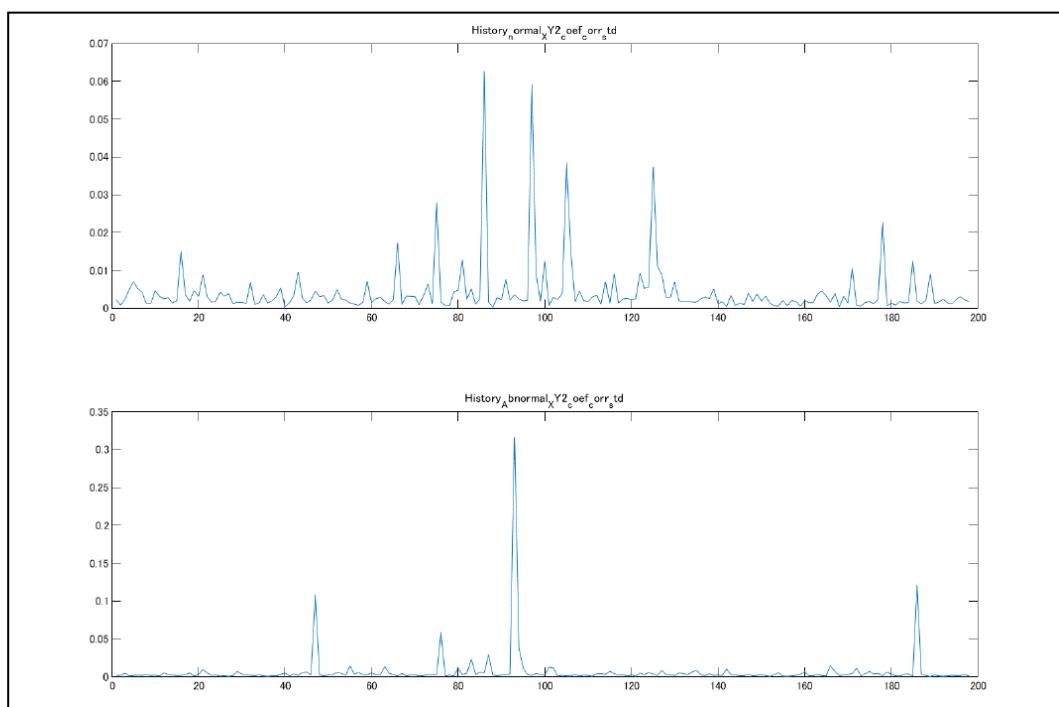


図 2.11 198 個分の相関係数の平均（上図：正常、下図：異常）

(8) 198 個分の相関係数の std

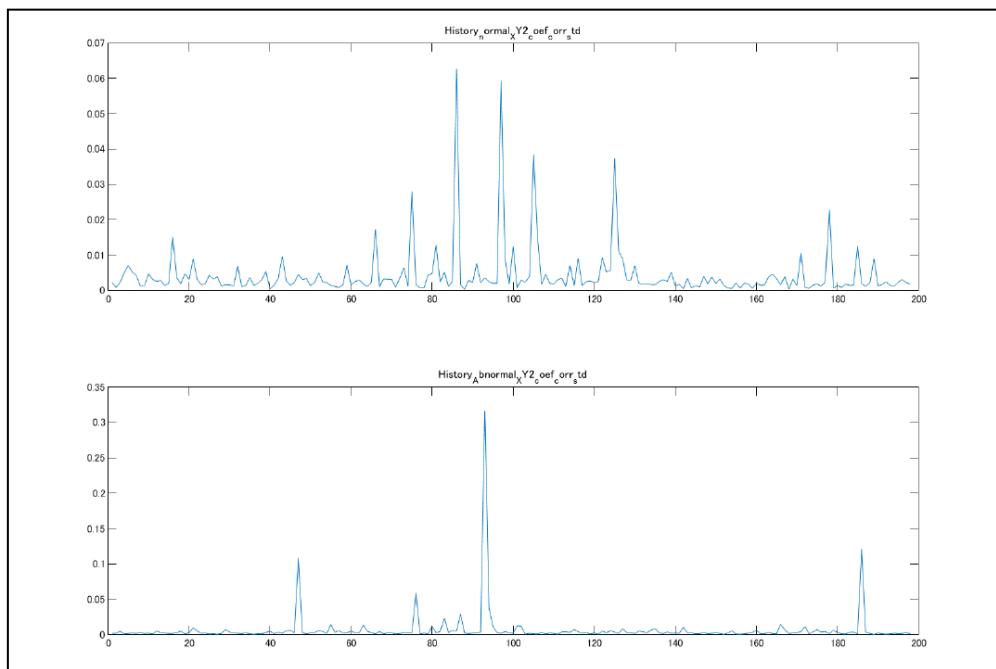


図 2.12 198 個分の相関係数の std (上図 : 正常、下図 : 異常)

(9) 相関係数の平均

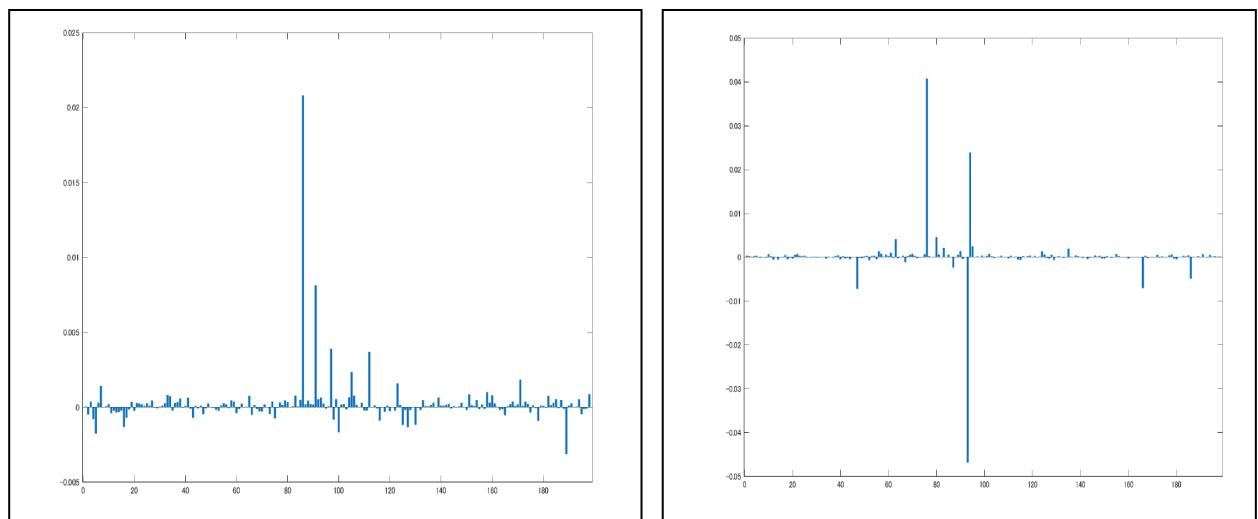


図 2.13 相関係数の平均 (上図 : 正常、下図 : 異常)

#### (10) 相関係数の std 平均

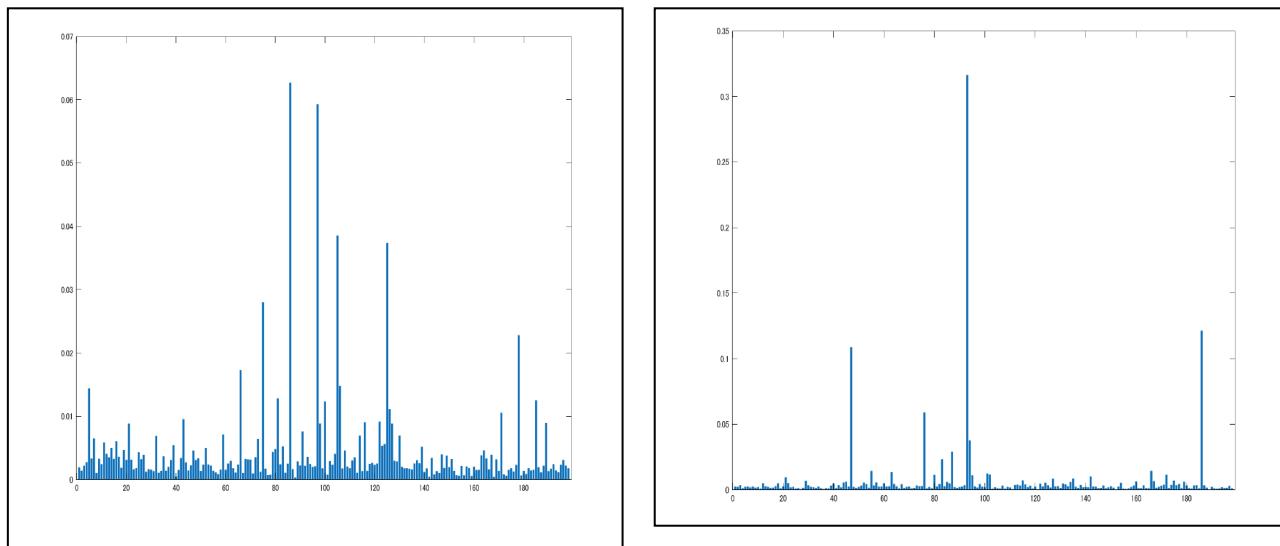


図 2.14 相関係数の標準偏差の平均（上図：正常、下図：異常）

#### 【3】正常・異常 CTG データの多変数多重度マルコフ確率辞書 (MMMD) の作成実験

文献[7]において、FHR のパワースペクトルを求めて、自律神経の活動状況を調べることが知られている。特に、低周波数域 (LF:0.04~0.15Hz) と高周波数域 (0.15~0.4Hz) のスペクトルを解析することにより、参考文献[8]に従って、matlab 上で副交感神経活動指標 (nHF と表す) と交感神経活動指標 (LFHF と表す) の頻度情報を求める事が出来る。正常と異常の nHF と LFHF の 1 重マルコフ確率の作成例を図 2.3-1 と図 2.3-2 に示す。NHF と LFHF は心拍数や血圧を上下する機能が反対に働くことが言われている。その様子がこれらの図から読み取れる。また、正常と異常の関係はで明白な違いはみられない

また、胎児の心拍数 RR のパワースペクトルの 2 変数 1 重マルコフ連鎖確率辞書を用いた異常データの検出実験（乱数誤りを用いたシミュレーション実験結果）を示した添付ファイル 2 を参照。

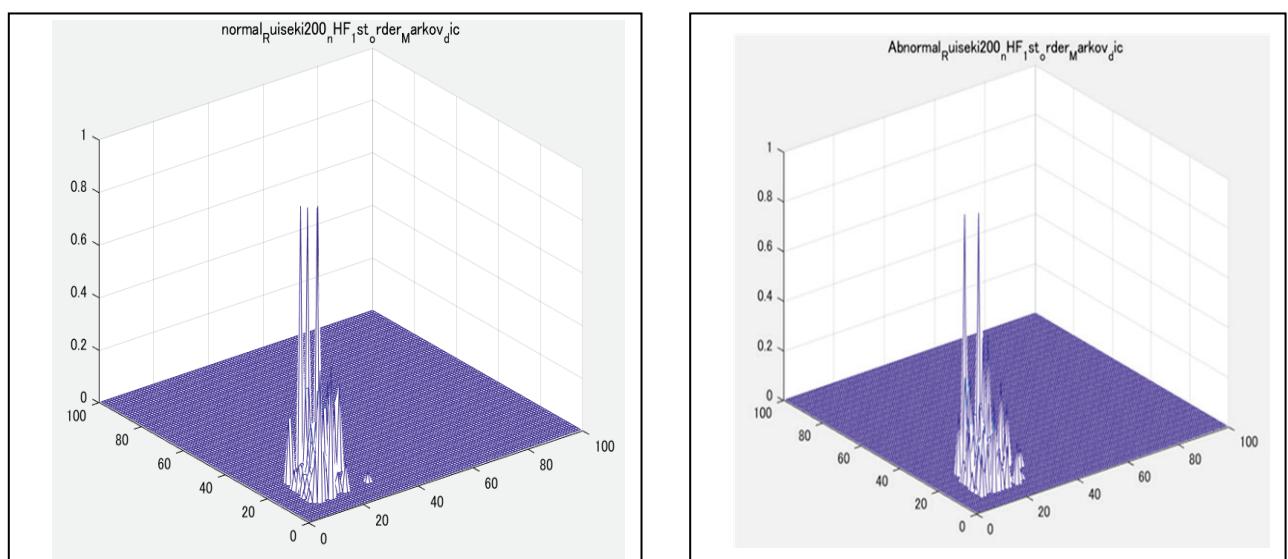


図 2.3-1 FHR のパワースペクトル nHF (副交感神経活動指標) の 1 重マルコフ確率辞書の例

(左図：正常、右図：異常、WS=64 の場合)

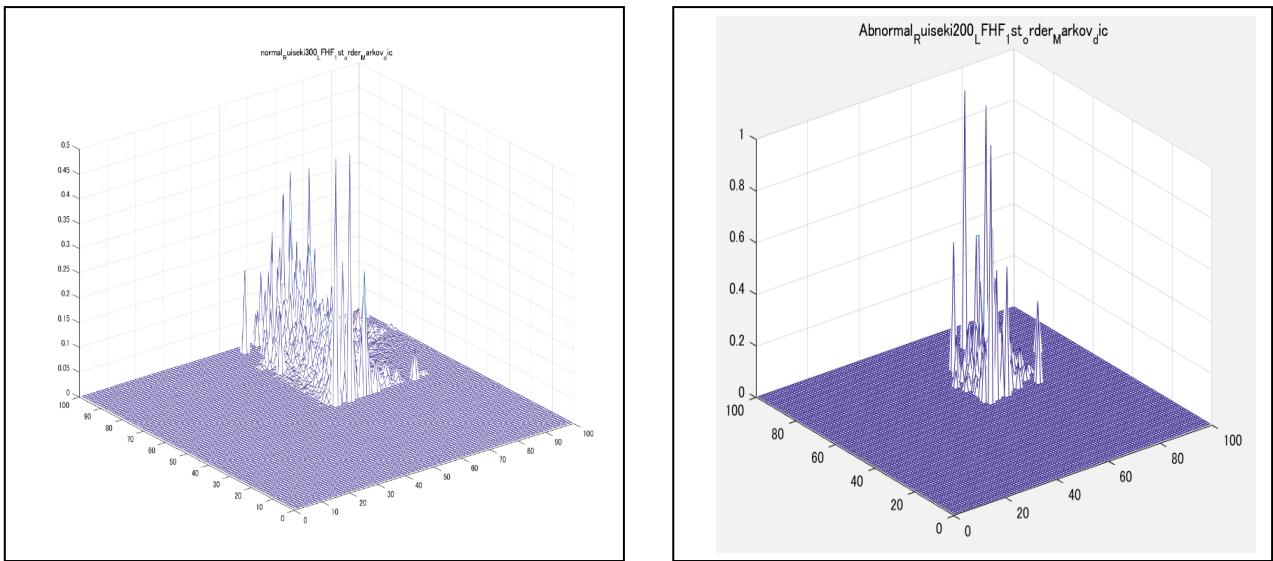


図 2.3-2 FHR のパワースペクトル LFHF (交感神経活動指標) の 1 重マルコフ確率辞書の例

(左図：正常、右図：異常、WS=64 の場合)

今回はコロナの関係で実験が計画通りに進めることができなかった。今後、window サイズ、シフトサイズの大きさを変化させて、多変数多密度マルコフ連鎖確率辞書の作成、並びにそれらを用いて正常・異常ふるい分け評価実験を行って行きたい。

そこでは、閾値の設定（変化させて）による下記の検出率を評価していきたい。なお従来、乱数を用いて擬似的に「発生させた誤りに関する検出実験結果については、添付ファイル 2 を参照。

① 正常な CTG のデータ集合 N に属するデータの正常性に関する検出成功率 (N (S))

$N(S)$  = 正常な CTG データに対して、正しく正常と検出された割合のこと。

② 正常な CTG のデータ集合 N に属するデータの正常性に関する検出失敗率 (N (D))

$N(D)$  = 正常な CTG データに対して、誤って異常と検出された割合のこと

③ 異常な CTG のデータ集合 E に属するデータの異常箇所の検出成功率 (E (S))

$E(S)$  = 異常な CTG データに対して、誤って正常と検出された割合のこと。

④ 正常な CTG のデータ集合 E に属するデータの異常箇所の検出失敗率 (E (D))

$E(D)$  = 異常な CTG データに対して、正しく異常と検出された割合のこと

## 6. おわりに

今回の実験を通して正常と異常の相違点について、198 個の CTG に関する外国人の公開データベースを用いて基本的な特性を調べ下記のような知見を得た。

### 【I】「遠隔からの胎児心拍数と陣痛圧図データの読み取り解析について」

- ① 実際に購入した装置を用いて数値動画像を静止画像に変換が可能であること、
- ② Matlab 上で OCR 読み取り技術を利用でき 90%以上の精度で読み取りが可能であること、
- ③ 読み取りを高精度に行うには、300 ルックス以上の部屋の明るさが必要であること  
が分かった。

### 【II】 「医師が胎児の異常状態（諦酸素状態）を検出支援する基本技術の検討

- (1) 胎児の正常と異常の CTG データに関して、基礎的な性質を調べて平均、標準偏差等において大差がないことがわかった。
- (2) 胎児心拍数 (FHR) のゼロ点位置の個数、
- (3) 自己相関関数、相互相関関数、相関係数の平均・標準偏差、
- (4) 交感神経活動 (LFHF) のマルコフ連鎖確率辞書
- (5) 副交感神経活動 (nHF) のマルコフ連鎖確率辞書

正常及び異常 CTG データに対して、高い正解率を得るために最適な閾値の設定法が今後の課題である。日本人の胎児に対して、実験を行って行き事が今後の課題である。(コロナ感染の問題)

時間軸の解析以外に、周波数領域の解析を行うことが今後の課題 (相互相関関数のフーリエ変換 (ウェーナー・ヒンチンの定理))

今回の実験は、コロナ下で病棟に医師・看護師以外が入ることが禁止 (現在も同じ状態) なって  
いるため、当初予定した実験がほとんど不可能となった。コロナ感染問題が落ち着いたころ、また購入し  
た機器を使用して実験を行って行きたい。

## 【参考文献】

【1】 小林浩著「僻地の周産期医療を支える遠隔診断システムの構築」日本産婦人科医会,遠隔医療ICT 妊

婦・胎児診断、(インターネット) , 2021

【2】 メロディ・インターナショナル (株) 「分娩監視装置iCTG」 iCTGパンフレット ver1.9s.pdf、2021

【3】 原量宏「胎児の健康状態管理のための胎児心拍数検出システム (分娩監視装置) 開発の経緯」、2014

年、百十四経済研究所調査月報、No.334、12, 2-9

【4】 荒木哲郎、池原悟、塙原信幸、小松康則、田川崇史：「m重マルコフ連鎖モデルを用いた日本語の誤字・脱落・誤挿入誤り文字列の検出と訂正法」電子情報通信学会論文誌, J83-D-II巻6号, p 1516-1528、2000.6

【5】 荒木睦大, “AIの深層学習による胎児と母親の心拍変動解析パターン対の動的識別法, ”信学技法, US2019-105, pp.35-40, 2020-02.

【6】 日本産科婦人科学会編「産婦人科診療ガイドライン—産科編」2017

【7】 Guidelines: Heart rate variability : Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use, Task Force of The European Society of Cardiology and The North American Society of Pacing and Electrophysiology (Membership of the Task Force listed in the Appendix) , European Heart Journal 17, 354–381, 1996.

【8】 小野弓絵著：“MATLABで学ぶ生体信号処理”，コロナ社pp59-81, 2018

【9】 荒木睦大他：特許「心拍状態処理装置」特許6403311号, 2018

【10】 Y.W.LEE, Statistical Theory of Communication, , John Wiley&Sons,.INC. ,  
1960

【11】 A.V. Oppenheim and R.W. Schafer, Digital Signal Processing, Bell  
Telephone Laboratories, Inc. 1975

【12】 A.Papoulis, Probability, Random Variables and Stochastic Processes,  
McGraw-Hill, Inc. 1965

【13】 W. Feller, An Introduction to Probability Theory and its Applications, vol.1,  
1957, John Wiley & Sons, Inc. 1957

【14】 伊藤清,確率論, 岩波書店, 1953

【15】 N. Wiener, Extrapolation, Interpolation, and Smoothing of Stationary Time Series, John Wiley & Sons, Inc.,  
1950

### 〈発表資料〉

題名	掲載誌・学会名等	発表年月
AIを用いた胎児機能の遠隔スクリーニング検査支援システム	特願 2021-125249	2021年7月出願
AIを用いた胎児機能の遠隔からのスクリーニング検査支援システムの研究 －多変数多重度マルコフ連鎖確率を用いた胎児の健康状態の評価法－	電子情報通信学会 US 研究会 US-2021-09	2021年9月発表