

情報通信技術とデジタルツインを融合した AI 駆動型胎児健康管理システム

代表研究者	Tunn Cho Lwin	宮崎大学・農学工学総合研究科 物質・情報工学専攻
共同研究者	Thi Thi Zin	宮崎大学・工学研究部 教授
共同研究者	Pyke Tin	宮崎大学・工学部 特別教授
共同研究者	紀 愛美	宮崎医師会病院 産科婦人科 副部長
共同研究者	池ノ上 克	九州医療科学大学 学長

1 導入および目的

本研究は、情報通信技術（ICT）と胎児ケアのためのデジタルツイン・フレームワークの統合を通じた、AI 主導の胎児心拍数変動（FHRV）解析の開発に焦点を当てている。分娩中に記録された胎児心拍数（FHR）信号には、胎児の状態や分娩時ストレスへの適応に関する重要な生理学的情報が含まれている。しかしながら、従来の胎児モニタリングは視覚的な解釈に依存することが多く、主観的になりがちで予測能力に限界がある [1, 2]。したがって本研究は、分娩中に記録された胎児心拍数信号を解析し、それらを出生時の胎児の状態と関連付けることにより、より客観的でデータ駆動型のアプローチを開発することを目的としている。具体的には、分娩前に観察された胎児心拍数のパターンが、新生児の酸素化および酸塩基平衡の重要な指標である「臍帯血ガス状態」の有用な予測因子に変換できるかどうかを調査する。本研究の目的は、胎児心拍数データから臨床的に有意義な特徴量を抽出し、血液ガス状態の予測モデルを構築して、将来の臨床的な胎児モニタリングにおけるリアルタイムの意思決定を支援する、デジタルツイン基盤のフレームワークを確立することである。

2 研究手法

2-1 データセットおよびその前処理

本研究で使用したデータセットは、2017 年から 2022 年の間に宮崎市郡医師会病院において、内測式胎児モニタリングにより収集された 585 例の胎児データから構成されている。このモニタリング手法では、分娩中に電極を胎児の頭皮に直接装着して胎児心拍数を記録すると同時に、子宮収縮の測定も行う。これらの内測式モニタリングデータは、外測式モニタリングと比較してより正確で信頼性の高い測定値を提供し、胎児の健康状態に関連する胎児心拍数変動や特徴的なパターンの詳細な解析に適している。さらに、分娩直後に採取された臍帯血ガスデータは、出生時の胎児の酸素化および酸塩基平衡状態を反映するため、臨床転帰の指標として使用した。

解析に先立ち、信頼性と比較可能性を向上させるため、胎児心拍数シグナルの前処理を行った。欠損値や異常なデータポイントは、前後の有効な観測値を用いた補間によって修正し、主要な波形パターンを維持しつつノイズの低減を行った。前処理後、データを標準化し、解析可能な区間に分割を行った。機械学習による解析においては、分娩前に少なくとも 30 分間の使用可能なデータが含まれる記録のみを対象とした。元の 585 例のうち、513 例がこの条件を満たし、対応する臍帯血ガスデータのラベルとの紐付けを行った。この前処理工程により、その後のイベント検出、エントロピー解析、および予測モデリングのための安定した入力データを得ることができた。

2-2 デジタルツインフレームワークの開発

実際の分娩と並行して稼働する、母体・胎児システムの仮想表現として、デジタルツイン・フレームワークが開発された [3]。本システムは、内部モニタリングからの胎児心拍数信号を継続的に受信し、それらをより容易に解釈できる視覚的および数値的な要約へと変換する。処理パイプラインには、前処理、5 分間のウィンドウへの分割、統計的およびエントロピーベースの特徴量の抽出、そしてこれらの特徴量と分娩直後に得られた臍帯血ガス結果との関連付けが含まれる。デジタルツインのダッシュボードは、心拍数の

トレンド、エントロピー曲線、および検出された生理学的イベントをリアルタイムで表示する。それと同時に、分類モデルが臍帯血検査において異常な結果となる尤度を推定し、その予測結果を寄与した特徴量とともに提示する。このフレームワークは、将来の臨床的な意思決定を支援するために設計された。



図 1. 分娩中における胎児心拍数の内測モニタリング

2-3 下降心拍イベントの検出および生理学的解釈

本研究の主要な部分は、胎児心拍数シグナルからの下降心拍イベントの検出に焦点を当てた。分娩中、胎児は子宮収縮や一時的な圧迫といった反復的な機械的ストレスを経験し [4]、これが短時間の副交感神経応答を誘発し、一過性の心拍数低下を引き起こす可能性がある [5]。従来のモニタリングでは、これらのイベントは固定されたベースラインや視覚的判断を用いて特定されることが多く、観察者間でばらつきが生じる可能性があった。この限界を克服するため、本研究では Savitzky-Golay フィルタにより推定された、時間変動ベースラインを用いた適応的な数学的手法を導入した。観測された胎児心拍数が適応型ベースラインから 15 bpm 以上低下した場合に、下降心拍として検出を行った。これにより、固定ベースラインを用いる手法よりも客観的かつ再現性の高い検出ルールを提供することができた。

下降心拍の検出後、下降心拍を含む区間と下降心拍を含まない、非下降心拍区間を比較するため、エントロピー解析を実施した。シグナルの複雑性を評価するために、シャノンエントロピー、近似エントロピー、サンプルエントロピー、およびマルコフエントロピーを算出した。その結果、下降心拍区間は一般に非下降心拍区間よりも高いエントロピー値を示すことが明らかになり、副交感神経関連のイベントには、より豊富で不規則な生理学的情報が含まれていることが示された。これらの知見は、下降心拍が分娩中における胎児の環境適応とストレス応答を示す有意義なマーカーであるという解釈を裏付けるものである。

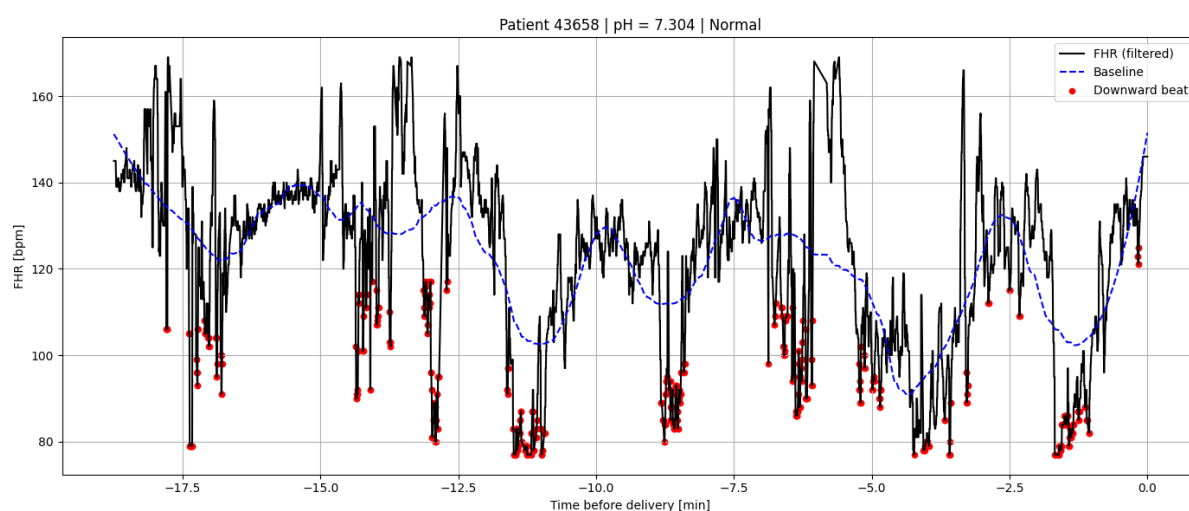


図 2. 下降心拍イベント検出例

2-4 血液ガス予測のための機械学習による分類

本研究の最終目的は、分娩中に記録された胎児心拍数データから臍帯血ガス状態を予測することである。分類の対象として、pH、PCO₂、およびHCO₃の3つの血液ガスパラメータを検討した。これらの結果は分娩後に測定されるものであり、胎児心拍数信号とは物理的な意味が異なるため、本課題は直接的な数値回帰問題としてではなく、分類タスクとして定式化された。分娩直前の30分間から抽出された特徴量をモデルの入力として使用し、血液ガス状態のカテゴリを出力ラベルとした。データセットは特に異常クラスにおいて非常に不均衡であったため、少数派クラスの検出精度を向上させる目的で、トレーニングデータに対してのみオーバーサンプリングを適用した。

主に、サポートベクターマシン (SVM) と k 近傍法 (kNN) の2つの教師あり機械学習手法について検討した。公正な比較を行うため、これらのモデルには同一の選択された特徴量と同一のデータ分割を適用した。モデルの性能評価には、混同行列および標準的な分類指標を用いた。3つの血液ガス・ターゲットの中で、PCO₂の分類結果がオーバーサンプリング後に最も顕著な改善を示し、最も代表的な結果とみなされた。感度、特異度、適合率、F1 スコア、および正解率のすべてがオーバーサンプリング後に向上しており、抽出された胎児心拍数の特徴量が、PCO₂に関連するパターンを識別する上で特に有益な情報を含んでいることが示唆された。対照的に、pH と HCO₃ の分類においても少数派クラスの検出に一定の改善が見られたものの、全体的な性能は依然として安定性に欠けるものであった。これらの結果は、胎児心拍数データから血液ガス状態を予測することの実現可能性を裏付けると同時に、クラスの不均衡に対処することの重要性を強調している。

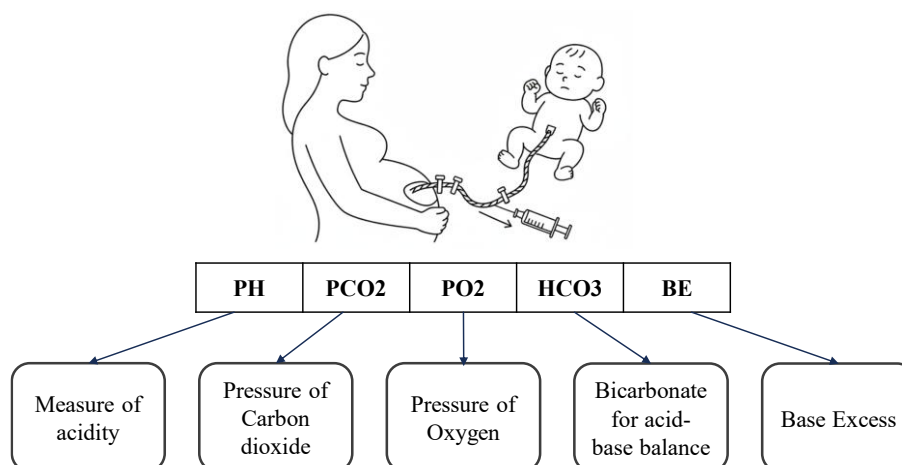


図 3. 分娩後における臍帯血ガスデータの取得

3 結論

本研究は、分娩中に記録された胎児心拍数信号に、出生時の胎児の状態を評価するために活用できる、臨床的に有意義な情報が含まれていることを実証した。さらに、下降心拍イベントの検出は、副交感神経系の活動に関する有用な知見を提供し、分娩中における胎児の環境適応に関連する重要な生理学的パターンを明らかにする一助となった。これらの知見は、将来のリアルタイム胎児モニタリングおよび臨床意思決定支援システムにおいて、AI、ICT、およびデジタルツイン技術を統合していく可能性を裏付けるものである。

【参考文献】

1. Lovers A, Daumer M, Frasc MG, Ugwumadu A, Warrick P, Vullings R, Pini N, Tolladay J, Petersen OB, Lederer C, Yang L, Djurić PM, Abtahi F, Holzmann M, Boudet S, de l'Aulnoit AH, Georgieva A. Advancements in Fetal Heart Rate Monitoring: A Report on Opportunities and Strategic Initiatives for Better Intrapartum Care. BJOG. 2025 Jun;132(7):853-866. doi: 10.1111/1471-0528.18097.
2. Gutiérrez VB, Bozhilova LV, Darko N, Georgieva A, O'Hara K. Intersectional dynamics and care disparities in intrapartum electronic fetal monitoring: a socio-technical systems perspective. BMC Pregnancy Childbirth. 2025 Jun 2;25(1):647. doi: 10.1186/s12884-025-07765-z.
3. Calcaterra V, Pagani V, Zuccotti G. Maternal and fetal health in the digital twin era. Front Pediatr. 2023 Oct 12;11:1251427. doi: 10.3389/fped.2023.1251427.
4. Ghi T, Fieni S, Ramirez Zegarrra R, Pereira S, Dall'Asta A, Chandrachan E. Relative uteroplacental insufficiency of labor. Acta Obstet Gynecol Scand. 2024 Oct;103(10):1910-1918. doi: 10.1111/aogs.14937.
5. Gordan R, Gwathmey JK, Xie LH. Autonomic and endocrine control of cardiovascular function. World J Cardiol. 2015 Apr 26;7(4):204-14. doi: 10.4330/wjc.v7.i4.204.

〈発表資料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
Markovian Digital Twins for Precision Healthcare: A Conceptual Framework	The 17th International Conference on Genetic and Evolutional Computing (ICGEC-2025)	2025 年 12 月
Advancing Neonatal Monitoring Using Heart Rate Variability with Machine Learning Models	The 17th International Conference on Smart Vehicular Technology, Transportation, Communication and Applications (VTCA 2025)	2025 年 11 月
Digital Cattle Twins: Revolutionizing Calving Management Through Markovian Prediction Systems	The 17th International Conference on Smart Vehicular Technology, Transportation, Communication and Applications (VTCA 2025)	2025 年 11 月
胎児モニタリングと臍帯血ガスパラメータ予測の連関解析： 胎児心拍変動を用いた教師あり学習アプローチ	画像工学会 (IE)	2025 年 9 月
Machine Learning-Based Classification of Umbilical Cord Blood Gas Using Fetal Heart Rate Variability	2025 IEEE International Conference on Consumer Electronics-Taiwan (ICCE-TW)	2025 年 7 月