



|              |                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|--------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Title        | 心音のカオス解析をもとにした胎児と母の非線形ダイナミクスの考察                                                                                                                                                                                                                                            |
| Author(s)    | 石山, さゆり                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Citation     | 大阪大学, 2026, 博士論文                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Version Type |                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| URL          | <a href="https://hdl.handle.net/11094/105771">https://hdl.handle.net/11094/105771</a>                                                                                                                                                                                      |
| rights       |                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Note         | やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、 <a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed">＜a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed"&gt;https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed</a> >大阪大学の博士論文について</a>をご参照ください。 |

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

## 論文内容の要旨

氏 名 ( 石 山 さ ゆ り )

## 論文題名

心音のカオス解析をもとにした胎児と母の非線形ダイナミクスの考察

## 論文内容の要旨

人間の身体は、単純な要素の総和としてではなく、相互作用によって全体が秩序を生み出す複雑系 (complex system) として理解される。従来の要素還元的・線形的分析のみでは、生体システムの全体像やその変化の本質を十分に捉えることは難しい。このような複雑な現象を説明する理論として注目されているのがカオス・複雑系理論 (chaos and complexity theory) である。本研究は、妊娠初期から出生後に至る胎児と母の心音を対象に、両者のカオスの秩序構造とその機能的動態を明らかにし、生命現象を動的な秩序生成と機能的適応の過程として捉えることを目的とした。

対象は4組の妊婦とその胎児であり、妊娠11週から出生後にかけて、安静時 (R)、母親による声かけ刺激時 (V1)、声かけ刺激後 (A1)、見知らぬ他者による声かけ刺激時 (V2)、他者の声かけ後 (A2) の5場面でドップラー超音波法により心音波形を測定した。得られた心音波形時系列データから相関次元解析し、多次元相空間に埋め込み、アトラクター (attractor) を描出した。また、リアプノフスペクトラムからリアプノフ次元およびKolmogorov-Sinai (KS) エントロピーを算出し、構造的な複雑性ととも、心音波形が有する情報処理機能および適応的秩序形成能を評価した。

解析の結果、胎児および母の心音時系列データはいずれも5次元であり、最大リアプノフ指数 ( $\lambda_1$ ) は正であった。サロゲート法により、胎児と母の系それぞれが決定論的カオスであることが確認された。これは胎児系と母系が独立した生理的リズムではなく、胎児・母系が非線形的相互作用を行い自己組織化的な秩序と機能を生み出す複雑系であることを示している。

さらに、胎児、母それぞれの  $\lambda_1$  の変化から妊娠初期から妊娠後期にかけて3相の特徴ある相が存在することが明らかとなった。胎児のアトラクターは、妊娠経過とともに無秩序的状態からカオスアトラクターへと発達し、さらに母の声刺激によりその構造的な変化が促進された。一方、母のアトラクターは全期間を通して高次の安定性を維持し、胎児発達の基盤を支える場として作用していた。

胎児のリアプノフ次元は妊娠進行に伴い上昇し、出生後に母の値に収束した。これは、胎児の生理的情報処理機能が成長とともに拡大し、母と同等の秩序レベルに到達する過程を示す。また、KSエントロピー解析では、胎児は妊娠初期から出生後にかけて段階的に上昇し、情報生成および環境適応機能の発達が認められた。母では妊娠後期に一時的に低下し、出産後に再上昇する変化が見られ、胎児の発達成長を支えるための一時的安定化と、出産後の再適応過程という二重機能的再構築が示唆された。

従来の要素還元的な方法、すなわち症例別、週数別、刺激の有無別などで分解して解析ではこのような結果は捉えることができなかった。しかし、カオス・複雑系に内在する特徴である、非加算的全体性とスケール変換的秩序、往還の視点で解析し、本研究の結果に至った。対象の全体像をとらえるには上記の視点に基づくことが必須であり、これなくして捉えることはできないことを実証的に捉えた初の試みである。要素還元を超えて、母と胎児の関係性をカオス・複雑系の視点から理解することは、生命理解の深化と、発達支援・周産期ケアの理論的基盤形成に寄与するものである。

## 論文審査の結果の要旨及び担当者

| 氏 名 ( 石山さゆり ) |     |     |       |
|---------------|-----|-----|-------|
| 論文審査担当者       | (職) | 氏 名 |       |
|               | 主 査 | 教授  | 遠藤 誠之 |
|               | 副 査 | 教授  | 上野 高義 |
|               | 副 査 | 教授  | 白石 三恵 |

## 論文審査の結果の要旨

本研究は、妊娠初期から出生後に至る胎児と母の心音を対象に、両者のカオス的秩序構造とその機能的動態を明らかにし、生命現象を動的な秩序生成と機能的適応の過程として捉えることを目的とした。

対象は4組の妊婦とその胎児であり、妊娠11週から出生後にかけて、安静時 (R)、母親による声かけ刺激時 (V1)、声かけ刺激後 (A1)、見知らぬ他者による声かけ刺激時 (V2)、他者の声かけ後 (A2) の5場面でドップラー超音波法により心音波形を測定した。得られた心音波形時系列データから相関次元解析し、多次元相空間に埋め込み、アトラクター (attractor) を描出した。また、リアプノフスペクトラムからリアプノフ次元およびKolmogorov-Sinai (KS) エントロピーを算出し、構造的な複雑性ととも、心音波形が有する情報処理機能および適応的秩序形成能を評価した。

解析の結果、胎児および母の心音時系列データはいずれも5次元であり、最大リアプノフ指数 ( $\lambda_1$ ) は正であった。サロゲート法により、胎児と母の系それぞれが決定論的カオスであることが確認された。これは胎児系と母系が独立した生理的リズムではなく、胎児・母系が非線形的相互作用を行い自己組織化的な秩序と機能を生み出す複雑系であることを示している。

さらに、胎児、母それぞれの  $\lambda_1$  の変化から妊娠初期から妊娠後期にかけて3相の特徴ある相が存在することが明らかとなった。胎児のアトラクターは、妊娠経過とともに無秩序の状態からカオスアトラクターへと発達し、さらに母の声刺激によりその構造的な変化が促進された。一方、母のアトラクターは全期間を通して高次の安定性を維持し、胎児発達の基盤を支える場として作用していた。

胎児のリアプノフ次元は妊娠進行に伴い上昇し、出生後に母の値に収束した。これは、胎児の生理的情報処理機能が成長とともに拡大し、母と同等の秩序レベルに到達する過程を示す。また、KSエントロピー解析では、胎児は妊娠初期から出生後にかけて段階的に上昇し、情報生成および環境適応機能の発達が認められた。母では妊娠後期に一時的に低下し、出産後に再上昇する変化が見られ、胎児の発達成長を支えるための一時的安定化と、出産後の再適応過程という二重機能的再構築が示唆された。

従来の要素還元的な方法、すなわち症例別、週数別、刺激の有無別などで分解して解析ではこのような結果は捉えることができなかった。しかし、カオス・複雑系に内在する特徴である、非加算的全体性とスケール変換的秩序、往還の視点で解析し、本研究の結果に至った。対象の全体像をとらえるには上記の視点に基づくことが必須であり、これなくして捉えることはできないことを実証的に捉えた初の試みである。要素還元を超えて、母と胎児の関係性をカオス・複雑系の視点から理解することは、生命理解の深化と、発達支援・周産期ケアの理論的基盤形成に寄与するものである。よって、本研究は博士(保健学)の授与に値するものと評価できる。