

原 著

胎児と母は決定論的カオスである：サロゲート法による解析

石山さゆり¹⁾・岩永浩明²⁾・田原 孝²⁾・清岡佳子¹⁾・大橋一友³⁾

¹⁾ 日本赤十字九州国際看護大学

²⁾ 医療・福祉基盤研究所

³⁾ 大阪大学大学院医学系研究科

Fetus and mother are a deterministic chaos : Analysis of surrogate data method

Sayuri Ishiyama¹⁾ ; Hiroaki Iwanaga²⁾ ; Takashi Tahara²⁾ ; Yoshiko Kiyooka¹⁾ and Kazutomo Ohashi³⁾

¹⁾ *Women's Health & Reproductive Health, The Japanese Red Cross Kyushu International College of Nursing*

²⁾ *Institute for Basic Medical and Welfare Research*

³⁾ *Division of Health Sciences, Osaka University Graduate School of Medicine*

Abstract

INTRODUCTION : Many studies have shown that human organs are a deterministic chaos. However, it remains unclear whether this is true for the human fetus and mother. We aimed to clarify whether the fetus and mother are a deterministic chaos or not. METHODS : We measured heart sounds of four human fetuses and their mothers during 11th-36th week of gestation using an ultrasonic Doppler apparatus. We investigated non-linearity of the data using the surrogate method. Data modified by three surrogate methods : Random shuffle, Fourier shuffle and Period-shuffle, were used in the study. We conducted a chaotic analysis to recognize the largest Lyapunov exponents (λ_1) and the attractor. RESULTS : The result of calculation of correlation dimension is five. λ_1 of the original data was significantly different from that of each surrogate data. Fetuses and mothers showed positive λ_1 from 11th to 36th week of gestation. Moreover, the attracters were clearly recognized for fetuses and mothers. The results indicate these data deterministic chaos with nonlinear dynamics. DISCUSSION : These results indicate that fetus and mother are a deterministic chaos, and that fetus and mother showed the self-organization ability to interact nonlinearly.

Key words : fetus and mother, deterministic chaos, self-organization, surrogate data method

要 旨

はじめに：ヒトの生体が決定論的カオスであることが多くの研究によって示されているが、ヒトの胎児と母では明らかにっていない。方法：4人の母とその胎児を対象に妊娠11週から36週まで、超音波ドップラー法で母児の心音を同時測定し、カオス解析を行った。Random shuffle, Fourier shuffle Period-shuffle のサロゲートを行い、母児のデータのランダム性を検証した。最大リアプノフ指数 (λ_1) の計算、アトラクターの抽出を行った。結果：相関次元は5次元であった。3種のサロゲート法すべてにおいて母児データのランダム性が棄却された。母児の λ_1 は正であり、両者のアトラクターが抽出できた。これらのことから胎児と母は決定論的カオスであることが示された。考察：本結果は妊娠初

連絡著者：石山さゆり

日本赤十字九州国際看護大学

〒811-4143 福岡県宗像市アスティ 1-1

E-mail : s-ishiyama@jrckicn.ac.jp

受領日 2017年5月22日

期から後期にわたって胎児と母が決定論的カオスであり、非線形相互作用する自己組織化能力を備えていることを明らかにした。

キーワード：胎児と母，決定論的カオス，自己組織化，サロゲート法

キーメッセージ

1. 今回の研究は看護・介護のどのような問題をテーマにしているのか？

研究を行うきっかけとなったことはどのようなことか？

看護の本質とは相互作用と考えられますが、それを理解し納得する理論も方法にも出会いませんでした。相互作用の本質である非線形系を理解する方法がカオス・複雑系であることを学び、胎児と母に適用することを考えました。

2. この研究成果が看護・介護にどのように貢献できるのか？あるいは、将来的に貢献できることは何か？

従来の線形の要素還元的な手法に代わって、この領域の本質である非線形に注目することで、新たな看護理論の枠組みと実践方法が構築できると考えます。

3. 今後どのような技術が必要になるのか？

非線形解析の技術と応用、その一例としてカオス・複雑系理論による分析と解析が必要であると考えています。

はじめに

カオス・複雑系は構成要素が多様な相互作用を行って系を構成する全体系であり、複雑系を構成する領域としてカオスがある。そのため、カオス・複雑系理論では対象を要素還元的に分解せずにさまざまな現象を調べる。このカオスとは決定論的カオスのことを意味し、一見ランダムに見えるが、ある秩序を生み出し、決定論に支配されている現象をいう。決定論的カオスがもつ特徴に自己組織化があり、自律的に秩序をもつ構造を作り出す現象のことであり、自発的秩序形成ともいう¹⁾。多くの自然現象や社会現象がカオス・複雑系であると報告されている。そしてヒト生体がカオス・複雑系であることが、心臓の拍動²⁾³⁾や脳波⁴⁾⁵⁾などの先行研究によって示されている。津田らは、指尖脈波の変化を用いて生体がカオス・複雑系であることを報告し、指尖脈波に現れるカオスの特徴がその人の健康状態や精神状態に関係している可能性を示唆した⁶⁾。

ヒト胎児のカオス解析を試みた先行研究では、胎児の健康状態を評価することを主たる目的としており、十分に胎児の自己組織化能力の存在を証明した研究ではない^{7)~9)}。一般的にカオスの構造と機能はアトラクター (Attractor) やリアプノフ指数 (Lyapunov exponent) などの指標で表現され、アトラクターの抽出と最大リアプノフ指数 (λ_1) が正であることがカオスであることの必要条件である⁶⁾。しかし単なる雑音でも正のリアプノフ指数を示すことがあるため、サロゲート法により雑音 (ランダムノイズ) でないことを証明する必要がある¹⁰⁾。しかし、この点について胎児と母の両者のカオス解析において十分に評価した研究はない。

本研究では、胎児と母の心音を測定しカオス解析を行い、胎児と母が決定論的カオスであることを明らか

にした。

方 法

用語の定義

1) アトラクター

カオス性を備える時系列データの軌跡を、次元解析により対応する埋め込みを行い、図示したものである⁶⁾。時系列データがカオスであればカオスに特徴的なストレンジアトラクターを呈し、規則的な周期変動であればアトラクターの軌道は円を描くりミットサイクルやドーナツ状の軌跡 (トーラス) を示す。逆に時系列データがランダムな現象であればアトラクターは形ある軌跡を呈さず、アトラクターを抽出できない¹¹⁾。

2) リアプノフ指数

近接した軌道が経時的に離れていく度合いを示し、そのうち最大のリアプノフ指数 (λ_1) が正であることはカオスであることを示すもっとも重要な指標である¹²⁾。最大リアプノフ指数とは時系列信号をM次元空間に埋め込んだアトラクターから、M個のリアプノフ指数が算出され、各軸のリアプノフ指数の大きいものから順に、第1リアプノフ指数 (λ_1)、第2リアプノフ指数 (λ_2)、第3リアプノフ指数 (λ_3) と呼ばれる。そのなかの第1リアプノフ指数が最大リアプノフ指数である¹³⁾。しかし得られた結果が単なる雑音でも正のリアプノフ指数を示すことがあるため、その結果が信頼できるか否かをサロゲート法により検討する必要がある¹⁴⁾。

3) 自己組織化

決定論的カオスがもつ特徴的な能力である。系を構成する要素が自律的に秩序をもつ構造を作り出す現象のことであり、自発的秩序形成ともいう¹⁾。自己組織化の例として、自然現象としては生物進化、感染動

態、地震・台風などがあり、生命現象では細胞機能・代謝、心拍、脈波、脳波などにみられる。さらに社会現象においては交通渋滞、株の変動、金融動態などがあり、多くの自然・社会現象が自己組織化による現象である¹⁵⁾¹⁶⁾。

対 象

A病院産婦人科外来に研究協力者募集のポスターを掲示し、応募のあった5名に対し研究協力内容、倫理的配慮の説明を行い、同意が得られた5名を研究協力者とした。そのうちの1名が死産となったため、研究対象者は4人の正常に経過した単体胎児とその母である。母の年齢は27から37歳であった。

方 法

調査期間は2012年3月から2013年2月であった。妊娠11週から36週の間、2から4週ごとに継続的に4組の胎児とその母の心音を測定し、合計26時点に関するデータを得た。

心音の測定は、静かな個室で、平均室温23℃、平均湿度50%の条件を保ち、妊婦をセミファラレー位でベッドに5分間臥床させたあとに行った。胎児とその母の心音を超音波ドップラー聴診器(Doppler Fetus Detector FD-390 TOITU)を用いて母の腹壁上より胎児の心音を、母の胸部から母体心音を同時に測定した。ドップラー法で得られた心音を受信波サンプリング周波数1 KHz、16 bitでA/D(Analog-to-Digital)変換し、パーソナルコンピュータ内にデジタル化した音波形としてとらえ、取り込んだ。

本手法は心拍数を評価するのではなく、得られた心音波形のなかに存在するすべての情報を抽出しようとするものである。カオス解析手法は津田らの方法⁶⁾に則り、定常状態を確保できる1分間の測定データをカオス解析した。測定中、胎動などで胎児心音が聴取できない場合は、聴取できる状況を待ち測定した。

調査前に成人男性1名を対象に、超音波ドップラー法と心電図との同時測定を行って、両測定法の1周期が対応することを確認した。

1. サロゲート法

任意の心音波形の連続10秒分をランダムに選択し、オリジナルデータとした(データ16384点)。そのオリジナルデータをもとに、3種類のサロゲートデータを39個ずつ作製した^{17)~19)}。①Random shuffle サロゲートはオリジナルデータを乱数表に基づいて並び替えて作製した。②Fourier shuffle サロゲートはオリジナルデータをフーリエ変換したあとに、その位相のみをランダム化し、逆フーリエ変換を施行し、ここで得られた時系列のランクを保つように、オリジナル

データを並び替えて作成した。③Period-shuffle サロゲートは、オリジナルデータを一定の周期ごとに切り、乱数表を用いてランダムに並び替えて作製した。

サロゲート法の帰無仮説は①Random shuffle サロゲートでは「オリジナルデータは確率過程(ランダムノイズ)に従う。」、②Fourier shuffle サロゲートでは「オリジナルデータの正弦波の重ね合わせ(線形結合)で記述される。」、③Period-shuffle サロゲートでは「心音波形の各周期にはダイナミックな相関が存在しない。」である。①~③の帰無仮説が棄却された場合、オリジナルデータは①「ランダムノイズではない。つまり決定論的である。」、②「正弦波の線形結合で記述されない。つまり非線形結合で記述される。」、③「各周期が無意味に並んでいるのではない。つまり周期間に非線形的な相関が存在する。」と判断する。

オリジナルデータとサロゲートデータの λ_1 の比較にはモンテカルロ有意差検定を用いた(有意水準=0.05)。

2. カオス解析

埋め込み次元を決定するためにGrassberger & Procaccia²⁰⁾²¹⁾の方法に基づき相関次元の解析を行った。得られた埋め込み次元をもとにアトラクターの再構築を行った⁶⁾²²⁾²³⁾。アトラクター抽出の成功率は一般に低いため、アトラクターが抽出されれば、解析プログラムの妥当性と信頼性を備えていると解することができる⁶⁾。最大リアプノフ指数はSano-Sawada²⁴⁾法を用いて計算した。リアプノフ指数は次元の数だけ存在するが、そのなかで最大のものを最大リアプノフ指数と呼び、解析に使用した。

倫理的配慮

研究対象者に対し、研究の趣旨、測定方法、参加の自由、途中辞退の保障、利益不利益、個人情報・実験データの守秘、機密性の確保、結果の公開方法などを口頭と文書で説明し、書面で同意を得た。なお本研究は日本赤十字九州国際看護大学倫理審査委員会の承認(承認番号12-06)を得て実施した。

結 果

1. サロゲート法

1) 胎児心音の結果

胎児心音のオリジナルデータの λ_1 は1例をあげると0.1161であった。

胎児心音のサロゲートデータの検討では、

①Fourier shuffle サロゲート($n=39$)の λ_1 は0.006~0.0474(中央値0.0232)

②Random shuffle サロゲート($n=39$)の λ_1 は0.038~0.0413(中央値0.0394)

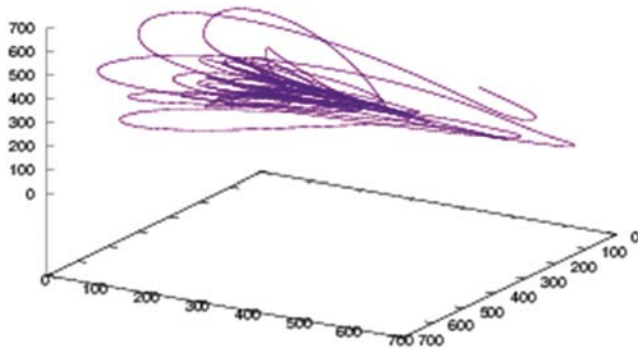


図1 胎児アトラクター

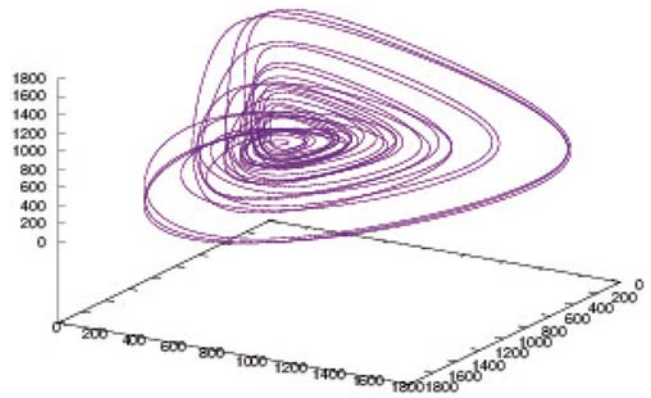


図2 母トラクター

③Period-shuffle サロゲート ($n=39$) の λ_1 は 0.1877~0.2258 (中央値 0.2018) であった。

胎児心音のオリジナルデータの λ_1 と①②③の3種のサロゲートデータに有意差がみられた (有意水準 = 0.05)。

2) 母心音の結果

母のオリジナルデータの λ_1 は1例をあげると 0.0342 であった。

母心音のサロゲートデータの検討では、

①Fourier shuffle サロゲート ($n=39$) の λ_1 は 0.0019~0.0241 (中央値 0.0071)

②Random shuffle サロゲートの λ_1 ($n=39$) は 0.02~0.0216 (中央値 0.0208)

③Period-shuffle サロゲートの λ_1 ($n=39$) は 0.0692~0.0847 (中央値 0.0800) であった。

母心音のオリジナルデータの λ_1 と①②③の3種のサロゲートデータに有意差がみられた (有意水準 = 0.05)。

上記 ① Fourier shuffle, ② Random shuffle, ③ Period-shuffle のサロゲート法によって帰無仮説が棄却されたので、胎児と母のオリジナルデータは①「ランダムノイズではない。つまり決定論的である。」、②「正弦波の線形結合で記述されない。つまり非線形結合で記述される。」、③「各周期が無意味に並んでいるのではない。つまり周期間に非線形的な相関が存在する。」と判断できた。

2. カオス解析

Grassberger & Procaccia²¹⁾²²⁾の方法に基づき相関次元の解析を行い、5次元のトポロジーを3次元に写影し、胎児と母のアトラクターを抽出できた (図1, 2)。

図の各軸は5次元を3次元に写影していることを表わしている。軸の絶対値に意味はないため単位の記述はしていない。

胎児と母のリアプノフスペクトラム解析を行い、5次元であることが判明し、 λ_1 以外の λ_2 , λ_3 , λ_4 , λ_5 を計算して以下の結果を得た。

胎児心音: $\lambda_1 > 0$ $\lambda_2 > 0$ $\lambda_3 = 0$ $\lambda_4 < 0$ $\lambda_5 < 0$

母心音: $\lambda_1 > 0$ $\lambda_2 > 0$ $\lambda_3 = 0$ $\lambda_4 < 0$ $\lambda_5 < 0$

妊娠11週から妊娠36週に対し26時点を解析したところ母児の λ_1 はすべて正であった。

考 察

胎児と母から得られた妊娠11週~36週の心音がすべて5次元の決定論的カオスであることは、それをシステムとして有する胎児と母がともに5次元の決定論的カオスであることを意味する。本研究では、正常経過の胎児と母の心音データをサロゲート法によって検定し、そのランダム性を棄却した。さらに胎児と母の心音の λ_1 が正であることを観察した。対象を次元解析し、その λ_1 が正であれば観察対象が決定論的カオスであると考えられる¹²⁾。またアトラクター抽出の成功率は一般に低いため、アトラクターが抽出されれば、解析プログラムが妥当性と信頼性を備えていると解することができる⁶⁾。本研究では対象のアトラクターの抽出に成功し、それはカオスに特徴的なストレンジアトラクターを呈した。

このように胎児心音と母心音の解析から胎児・母系は決定論的カオスであることが実証された。これらの結果より、胎児は妊娠初期から自己組織化能力を備えており、内的環境と外的環境の両方に特異的に働きかけ、かつ、働きかけられている状態が非線形相互作用として表出されていると考えられる。

胎児と母が非線形相互作用をする自己組織化能力を備えたカオス・複雑系であるか否かは胎児と母をどのような存在とみなすかという根本的問題にかかわっている。ヒトの生体がカオスであることを実証した研究や考察は多数あり²⁾⁻⁶⁾、また胎児に関しても、心拍のカオス解析を試みたものもある⁷⁾⁻⁹⁾が、胎児個体の異

常の発見や健康状態の評価を目的としている。しかし、胎児は母と切り離して評価はできない。母の胎内で臍帯・胎盤とつながり、あらゆる母体の影響を受ける。つまり、母児一体である。なおかつ胎児は母体外の環境ともマクロレベルで相互作用する存在である。そして胎児自らもその成長・発達過程において、自分の細胞内でのミクロレベルの相互作用をしていると考えられ、また、母も環境と相互作用し、自身の中で相互作用していると考える。この相互作用の本質が両者がもつ自己組織化によるものであることをこのデータは意味している。

看護・助産ケアは環境と人間、人間と人間、親と子など、多種多様な相互作用を扱うことにその本質がある。しかし、「相互作用」は複雑な現象であり、このような現象を正しく理解するためには総合的な手法が必要であるといわれている²⁵⁾。親と子の bonding について研究した Klaus & Kennel らも、その要素還元的研究手法の限界について以下のように述べている。「多数の相互作用をやむを得ず単純化して記述したが、行動というものは単に鎖がつらなように起こるものではない。相互作用を説明するには同時的ではなく、順序立てて記述するが、相互作用を理解するためには、どうしても現実の過程の豊かさを犠牲にせざるを得ない。」²⁶⁾

本研究においては胎児とその母を対象としたが、今後さらに看護・助産領域における相互作用をカオス・複雑系の特徴である自己組織化で理解することが、新たな看護・助産領域の研究や実践のさらなる発展につながると考える。なお妊娠週数に伴う母児の λ_1 とアトラクターや情報の流れ等の変化については、引き続き次論文で発表する予定である。

ま と め

1. 胎児とその母の系は決定論的カオスである。
2. そのことは胎児とその母が自己組織化能力を持ち、非線形相互作用していることを示す。
3. 上述のことは看護・助産領域の新たな概念構築と実践につながる。

謝 辞

北海道大学電子科学研究所複雑系 数理研究分野教授 津田一郎先生をはじめ、本研究にご支援・ご指導いただいている多くの学際領域の先生方に感謝申し上げます。

また、本研究に快くご協力いただいた研究協力者の皆様に感謝申し上げます。

文 献

- 1) Haken H. Synergetics An Introduction Nonequilibrium Phase Transitions and Self-organization in Physics : Chemistry and Biology, 191, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1981.
- 2) Babloyanz A, Deatexhe A. Is a normal heart a periodic oscillator?. Biological Cybernetics 58 : 203-211, 1988.
- 3) Goldberger AL, Ringney DR, Mietus J, et al. Nonlinear dynamics in sudden cardiac death syndrome : heart rate oscillations and bifurcations. Experientia 44 : 983, 1988.
- 4) Babloyantz A. Evidence of chaotic dynamics of brain activity during the sheep cycle. Dimension and Entropies in Chaotic System (G Mayer-Kress, ed), 241, Springer, Berlin, 1986.
- 5) Rapp PE. Dynamics of brain electrical activity. Brain Topography 2 : 99, 1989.
- 6) Tsuda I, Tahara T, Iwanaga H. Chaotic pulsation in human capillary vessels and its dependence on mental and physical conditions. Int J Bifurcat Chaos 2 : 313-324, 1992.
- 7) Chaffin DG, Goldberger GG, Reed KL. The demotion of chaos in the fetal heart rate. Am J Obstet Gynecol 165 : 1425-1429, 1991.
- 8) Kikuchi A, Shimizu T, Hayashi A, et al. Nonlinear analyses of heart rate variability in normal and growth-restricted fetuses. Early Hum Dev 82 : 217-226, 2006.
- 9) Hoh JK, Park YS, Cha KJ, et al. Chaotic indices and canonical ensemble of heart rate patterns in small-for-gestational age fetuses. J Perinat Med 35 : 210-216, 2007.
- 10) 池口 徹, 山田泰司, 小室元政. カオス時系列解析の基礎と応用 (合原一幸編), 253-254, 産業図書, 東京, 2011.
- 11) 池口 徹, 合原一幸. 力学系の埋め込み定理と時系列データからのアトラクタ再構成. 日本応用数理学会誌 7 : 260-270, 1997.
- 12) 金子邦彦, 津田一郎. 複雑系のカオス的シナリオ, 30-40, 朝倉書店, 東京, 1996.
- 13) 今西 明, 雄山真弓. 生理心理学における新たな解析手法の提案 生体信号のカオス解析. 人文論究 58 : 23-42, 2008.
- 14) 池口 徹, 山田泰司, 小室元政. カオス時系列解析の基礎と応用 (合原一幸編), 253-254, 産業図書, 東京, 2011.
- 15) 田原 孝, 久保田競. 医学概論, 137-138, 日本福祉大学, 愛知, 2003.
- 16) 金子邦彦, 津田一郎. 複雑系のカオス的シナリオ, 4-21,

朝倉書店, 東京, 1996.

- 17) Theiler J, Eubank S, Longtin A, et al. Testing for non-linearity in the time series : the method of surrogate data. *Physica D* 58 : 77-94, 1992.
- 18) Theiler J, Rapp PE. Re-examination of the evidence for low-dimensional, nonlinear structure in the human electroencephalogram. *Electroencephalogr Chin Neurophysiol* 98 : 213-222, 1996.
- 19) Theiler J. On the evidence for low-dimensional chaos in an epileptic electroencephalogram. *Phys Lett A* 196 : 335-341, 1995.
- 20) Takens F. Detecting strange attractors in turbulence. *Lecture Notes in Mathematics* 898 (Rand D and Young L S eds), 366-381, Springer-Verlag Press, Berlin, 1983.
- 21) Grassberger P, Procaccia I. Characterization of strange attractors. *Phys Rev Lett* 50 : 346-349, 1983.
- 22) Grassberger P, Procaccia I. Measuring the strangeness of strange attractors. *Physica D* 9 : 189-208, 1983.
- 23) Packard NH, Crutchfield JP, Farmer JD, et al. Geometry from a time series. *Phys Rev Lett* 45 : 712-715 1980.
- 24) Sano M, Sawada Y. Measurement of the Lyapunov spectrum from a chaotic time series. *Phys Rev Lett* 55 : 1082-1085, 1985.
- 25) 米沢富美子. 複雑さを科学する, 70-80, 岩波書店, 東京, 1995.
- 26) Marshall HK, John HK, Phllis HK. *Bonding : Building the foundations of secure attachment and independence*, 95-105, Da Capo Press, USA, 1995.