



Title	生体信号における長時間相関スケーリング構造の破綻現象に関する研究
Author(s)	藤本, 雄大
Citation	大阪大学, 2026, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/105528
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、大阪大学の博士論文についてをご参照ください。

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 (藤本 雄大)	
論文題名	生体信号における長時間相関スケーリング構造の破綻現象に関する研究
論文内容の要旨 パワースペクトルが$1/f^\beta$型を示すゆらぎは自然時系列や生体信号に広く観測される。スケーリング指数βは時系列ダイナミクスを支配する自己相関を特徴づける指標であり、加齢や疾患によって変化することから、その重要性が示されている。弱定常過程では、$-1 < \beta < 1$のとき長時間相関特性を持つことから、本研究では$1/f^\beta$ゆらぎに着目した解析を長時間相関解析と呼び、長時間相関を詳細に特徴づける新たな解析法を提案する。 近年、トレンドを含む時系列にも適用可能な長時間相関解析として、detrended fluctuation analysis (DFA) や detrending moving-average analysis (DMA) が用いられている。DFAやDMAはスペクトル解析に比べて複雑な前処理が不要で幅広い領域で利用されており、本研究ではこれらの解析法を中心に議論する。 さらに、$1/f^\beta$型パワースペクトルのスケーリング構造の破綻現象に着目する。破綻現象とは、両対数プロットの直線の傾きのみが変わるのではなく、直線性自体が失われることを意味する。実データでは、スケーリング指数がスケールに依存して変化するクロスオーバー現象などが観測され、これは$1/f^\beta$ゆらぎからの逸脱を意味するが、十分に注目されてこなかった。そこで本研究では、従来の直線性を前提とした枠組みを拡張し、局所的なスケールにおける自己相関特性の変化に着目した新たな解析手法を提案する。 論文ではまず、スケールの変化に伴う局所的なスケーリング指数の推移を評価するスケーリングスペクトルを導入し、$1/f^\beta$型の崩れを強調した解析を可能にした。さらに、推定幅も変化させ、スケーリング構造の多様な変化を統合的に評価するスケーリングプロファイルを導入した。これらを心拍変動時系列に適用し、その有用性を検証した。 次に、長時間相関解析のクロスオーバー現象が示す二つの異なるスケーリング指数とその変化点を、ローカルスロープの二峰性を利用して推定する方法を提案し、重心動揺時系列に応用することでクロスオーバー現象を定量化した。 最後に、スケーリング構造の破綻現象をクロスオーバー現象と対数周期振動に大別し、拡張した自己回帰非整数積分移動平均過程 (auto-regressive fractionally integrated moving average: ARFIMA) でモデリングを行い、心房細動の予後予測解析への応用可能性を示した。	

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (藤本 雄大)			
	(職)	氏 名	
論文審査担当者	主 査	教 授	清野 健
	副 査	教 授	大城 理
	副 査	教 授	中村 亨

論文審査の結果の要旨

本論文は、生体信号に広く観測される $1/f^\beta$ 型パワースペクトルを示すゆらぎに着目し、その背後にある長時間相関構造を従来よりも詳細かつ多面的に特徴づける新たな解析枠組みを提案したものである。 $1/f^\beta$ 型パワースペクトルにおけるスケーリング指数 β は、時系列ダイナミクスに内在する自己相関特性を統計的に特徴づける重要な指標であり、加齢や疾患に伴って変化することが報告されてきた。本研究は、 $1/f^\beta$ 型のスペクトル構造を有するゆらぎから視点を拡張し、その構造の変化や破綻を詳細に分析することを目的としている。

近年、トレンドや非定常性を含む時系列にも適用可能な長時間相関解析法として、detrended fluctuation analysis (DFA) や detrending moving-average analysis (DMA) が広く用いられてきた。これらの手法は、スペクトル解析に比べて複雑な前処理を必要とせず、多様な実データに適用可能である点に特徴がある。本論文では、これらの手法を理論的・実践的基盤として位置づけつつ、従来暗黙の前提とされてきた「両対数プロット上の直線性」に着目し、その前提が必ずしも成立しない場合を含めた解析枠組みの拡張を試みている。

特に本研究は、 $1/f^\beta$ 型型パワースペクトルにおいて、スケーリング指数が単に変化するのではなく、スケーリング構造そのものが局所的に崩れる「破綻現象」に注目している。実データでは、スケーリング指数がスケールに依存して変化するクロスオーバー現象などがしばしば観測されるが、これらは従来、解析上の困難さから十分に体系化されてこなかった。本論文は、このような現象を $1/f^\beta$ 型ゆらぎからの単なる逸脱として扱うのではなく、時系列が内包する重要な動的情報として捉え直している点に新規性がある。

具体的には、スケールの変化に伴う局所的なスケーリング指数の推移を評価する指標として「スケーリングスペクトル」を導入し、 $1/f^\beta$ 型構造の崩れを可視化する解析を可能にした。さらに、推定に用いるスケール幅の変化を含めて統合的に評価する「スケーリングプロファイル」を提案し、心拍変動時系列への応用を通じて、その有用性を実証している。これらの指標は、単一のスケーリング指数による従来の評価では捉えきれなかった、長時間相関構造の多様性を記述するための有効な枠組みを提供している。

また、クロスオーバー現象に着目し、ローカルスロープ分布の二峰性を利用して、二つの異なるスケーリング指数とその変化点を同時に推定する方法を提案している。この手法を重心動揺時系列に適用することで、従来は定性的に議論されることの多かったクロスオーバー現象を定量的に特徴づけることに成功しており、身体運動制御に関わる時系列解析への新たな知見を与えている。

さらに本論文では、スケーリング構造の破綻現象をクロスオーバー現象と対数周期振動に大別し、拡張した自己回帰非整数積分移動平均過程 (auto-regressive fractionally integrated moving average: ARFIMA) を用いたモデリングを行っている。これにより、 $1/f^\beta$ 型スペクトルを有するゆらぎの多様なスケーリング構造を統一的に表現し、心房細動の予後予測解析への応用可能性を示している点は、工学的・臨床的意義の双方から高く評価できる。

以上のように、本論文は、特定の理想化された過程に限定されない 広範な $1/f^\beta$ 型ゆらぎを対象として、長時間相関構造の局所的変化や破綻現象を捉える新たな解析手法と理論的枠組みを提示している。その新規性、学術的価値、および生体信号解析を中心とした応用可能性はいずれも高く、関連分野の発展に大きく寄与するものと認められる。

よって、本論文は 博士 (工学) の学位論文として価値のあるものと認める。