

複雑な振動現象からの位相ダイナミクスの抽出

経験的モード分解とその応用

JST ERATO 合原プロジェクト／東京大学生産技術研究所 末谷 大道¹

我々の身の回りで見られる時間的に変動する現象を非線形振動として表現し解析する試みが盛んに行われるようになってきている。例えば、[1]では、真性粘菌内で生じる複数の代謝反応がその形態に変化を与え周辺長の時系列の振動的な性質として反映されることを報告している。また、[2]では、心拍変動と呼吸変動という波形としては異なる2つの時系列の間で見られる相関関係を位相同期(振動のタイミングの一致)という観点から解析しているし、他にも、Varelaらは、異なる領域で計測した脳波の γ 振動(30~80Hz)の間で見られる過渡的な位相同期が認知行為と関連することを報告している[3]。

位相(phase)は、振動現象を特徴付ける基本的な変数である。散逸的力学系の場合、リミットサイクルに対してはアイソクロン(isochron)という状態空間上のスカラー場として位相変数を厳密に定義することが出来る。一方、例えばローレンツモデルのように、カオス系では複数の振動中心が存在し得るし、より広く自然界で観測される振動現象では非定常的性質やノイズなどが混在し、適切な位相変数はどうあるべきか、またどのようにデータから抽出できるのか、ということが問題になる。

信号処理の分野では、位相変数を与える方法の一つとして、Gaborによって提案された解析信号(analytic signal)が知られている[4]。解析信号とは、与えられた元のスカラー信号 $x(t)$ を実部、そのHilbert変換 $x_H(t)$ ($x(t)$ の各Fourier成分の位相を $\pi/2$ ずらした信号として解釈される)を虚部として構成される複素信号: $s(t) = x(t) + ix_H(t)$ であり、 $s(t)$ の偏角として時刻 t での(瞬時的な)位相と振幅が定義される。Gaborの解析信号が時間に対する単調増加性の意味で適切な位相変数を与えることができるのは狭帯域の信号に限られる。最近、Huangらは、この困難を乗り越えるために、広帯域で非定常性を含む信号に対しても極大値・極小値の位置情報に基づいてトレンド除去を再帰的に繰り返すことによって各成分の解析信号が適切な位相変数を持つように分解することを可能にする経験的モード分解(Empirical Mode Decomposition: EMD)と呼ばれる方法を提案した[5]。このEMDは、カオスの時系列[6]や視覚系の局所集団電位(local field potential: LFP)[7]、デング出血熱の発生で見られる進行波[8]の解析など、広く用いられてつある。

講演では、EMDについて簡単な例題を通じてその手法を導入するとともに、運動課題実行中のサルのLFP²で見られる間欠的な同期現象の解析や、シアノバクテリアの概日リズムに関する遺伝子発現データ³の時系列クラスタリングへの応用などについて紹介した。その一方で、ローレンツモデルやカオス的バーストを示すニューロンモデルなど、急峻な変化や間欠的な変動を示す信号にEMDを適用した場合、元々の信号にはなかった極大値・極小値が分解によって新たに作られ、それが下位のモードに伝播するというEMDが示すアーチファクトについても論じた。

EMDに限らず、一般に、短時間Fourier変換やwavelet変換など他の時間周波数解析においても、分解の結果出て来た成分・パターンに対して何か実体的な解釈を行おうとするときには危険が伴う。例えば、脳科学では脳波やLFPといった、ある程度集団的な神経活動に対して様々な信号処理を施して位相変数を抽出したりそれらの間での同期性などを論じているが、信号処理の結果出て来た位相が神経生理学的に脳活動の一体何を反映しているかは全く自明でない[9]。観測される信号に対して特徴抽出・類似度の判定といったパターン認識的な立場を超えて非線形力学的な解釈やモデリングを行おうとする際、信号処理の結果出て来た位相は何なのか、またどのように取り出すことが適切と言えるのか、という点について注意深く考える必要があるだろう。EMDそのものについても、Huangが提案したオリジナルの方法では手続き的操作の繰り返しでモデルとは呼べず、また出て来た結果を客観的に検証する術もない。このような問題についても今後解決すべき課題である。

¹E-mail: suetani@aihara.jst.go.jp

²データは東北大学医学部虫明元研究室より提供された。

³データは名古屋大学理学部近藤孝男研究室より提供された。

参考文献

- [1] Y. Kakiuchi and T. Ueda, *Biol. Rhyth. Res.* **37**, 137 (2006).
- [2] C. Schäfer, M.G. Rosenblum, J. Kurths, and H.-H. Abel, *Nature* **392**, 239 (1998); C. Schäfer, M.G. Rosenblum, H.-H. Abel and J. Kurths, *Phys. Rev. E* **60**, 857 (1999).
- [3] E. Rodriguez et al., *Nature* **397**, 6718 (1999); F. Varela et al., *Nat. Rev. Neurosci.* **2**, 229 (2001).
- [4] D. Gabor, *J. IEE (London)* **93**, 429 (1946).
- [5] N.E. Huang et al., *Proc. R. Soc. London, Ser. A* **454**, 903 (1998).
- [6] T. Yalçinkaya and Y.-C. Lai, *Phys. Rev. Lett.* **79**, 3885 (1997).
- [7] H. Liang et al., *Biol. Cybern.* **92**, 380 (2005).
- [8] D.A.T. Cummings et al., *Nature* **427**, 344 (2005).
- [9] M. Le Van Quyen and A. Bragin, *Trends in Neurosci.* **30**, 365 (2007).