

## Model Free Modelling:生態学・農学時系列データからのダイナミクス再構成

酒井憲司

東京農工大学大学院農学研究院

Tokyo University of Agriculture and Technology

Faculty of Agriculture

ken@cc.tuat.ac.jp

非線形時系列解析は時系列データから決定論的カオスの判別を行うことを目的として整備されてきた研究分野である。そこでは、時系列データのみから変動を支配する非線形ダイナミクスを再構成することが重要な課題となる。一般的には数千点のデータサイズを前提としているが、農学や生態学分野における時系列データのサイズは極めて小さく、数十点、十数点、さらには数点と言う場合もある。これは、年に一度の収穫機会しかないことによる。そのために、このような小さなサイズの時系列データから有用な情報を抽出するために様々な方法が提案されてきた。本セッションでは、カオス理論と非線形時系列解析の枠組みを生態学分野の実データ解析への応用の歩みについて紹介した。このような際には、May の論文(1974)<sup>1)</sup> から説き起こすのが一般であるが、これに先立つこと34年、Ezekiel<sup>2)</sup> (1938)が、ジャガイモの価格変動のダイナミクスをリターンマップを用いて考察した農業経済動学の古典も同時に紹介することとし、農学もカオス理論の起源に与っていることに触れさせていただいた。この May 論文は生態学だけではなく、物理学、工学、経済学、心理学などなど、広範な分野でのカオスブームのトリガーとなったものである。このテキストに示されている密度効果を抽出した漸化式  $X_{n+1}=aX_n(1-X_n)$ 、によって初期値への鋭敏な依存性、分岐構造、ファイゲンバウム数などを解説しながら、決定論的カオスのポートレートを示した。実験家としては当然、逆問題としての時系列データからのダイナミクス同定に関心がある。これ以降、様々な分野でカオス探索ブームが勃発するのだが、Hassell ら (1976)<sup>3)</sup> はその文献データ解析において、自然状態下における個体群変動のカオスの実在について冷静な姿勢を示している。これに対して、Symonides ら (1986)<sup>4)</sup> はヒメナズナの密度試験データのリターンマップを用いて、敢えて“カオス”というキーワードを慎重に避けつつ、“カオスの実在”について論じているのは印象的である。一方、Tilman ら(1991)<sup>5)</sup> は牧草個体群データのリターンプロットから、大胆にカオスを論じている。しかし、1次元のリターンマップによる非線形ダイナミクスの同定にはかなり限界があり、Turchin ら(1992)<sup>6)</sup> は少しでもその限界を打ち破るべく、応答局面法を提案した。

1980年代に非線形時系列解析が大きく発展を遂げ、相関次元、Lyapunov 指数、決定論的非線形予測、サロゲートアルゴリズム等の標準的ツールが整備された。特に、決定論的非線形予測は従来の相関次元や Lyapunov 指数に対して、比較的少数で信頼度の高いカオス判定手法として提案された。Sugihara 論文(1990)<sup>7)</sup> は生態学分野における決定論的非

線形予測の記念碑的な論文で、Model Free Modelling の端緒ともいえる。その後、数点という極小サイズの時系列データからのダイナミクスの同定法として提案したアンサンブル再構成法<sup>8)</sup> の解説を行った。

農業システムも含んだ広い意味での生態系管理を考える上で、非線形時空間ダイナミクスの同定<sup>9)</sup> と制御<sup>10)</sup> という視点は魅力的である。それを実用技術として実現するために、時空間データの取得方法<sup>11)</sup>、モデルの検証方法<sup>12)</sup>、評価方法、制御を現実の管理や栽培作業へと還元するための方法などを、多くの試行錯誤を経ながら構築して行くこととなるのである。

- 1) May, R.M., 1974. Biological populations with non-overlapping generations, stable points, stable cycles and chaos. *Science*, **186**:645-647
- 2) Ezekiel, M., 1938. The Cobweb Theorem. *Q. J. Econ* **53**:255-280
- 3) Hassell, M.P., Lawton, J.H. and May, R.M., 1976. Patterns of dynamical behaviour in Single-Species Populations. *The Journal of Animal Ecology*, **45**(2):471-486
- 4) Symonides, E., Silvertown, J. and Andreasen, V., 1986. Population cycles caused by overcompensating density-dependence in annual plant. *Oecologia*, **71**:156-158
- 5) Tilman, D. and Wedin, D., 1991. Oscillations and chaos in the dynamics of a perennial grass. *Nature*, **353**:653-656
- 6) Turchin, P. and Taylor, A.D., 1992. Complex dynamics in ecological time series. *Ecology* **73**: 289-305
- 7) Sugihara, G. and May, R., 1990. Nonlinear forecasting as a way of distinguishing chaos from measurement error in time series. *Nature*, **344**: 734-741
- 8) Sakai, K., Noguch, Y. and Asada, S., 2008. Detecting Chaos in a Citrus Orchard: Reconstruction of nonlinear dynamics from very short ecological time series. *Chaos Solitons & Fractals*, **38**: 1274-1282
- 9) Satake, A. and Iwasa, Y., 2002. Spatially limited pollen exchange and a long-range synchronization of trees, *Ecology* **83**:993-1005
- 10) Sakai, K. and Noguchi, Y., 2009. Controlling chaos (OGY) implemented on a reconstructed ecological two-dimensional map. *Chaos, Solitons & Fractals*, **41**(2):630-641
- 11) Ye, X., Sakai, K., Manago, M., Asada, S. and Sasao, A., 2007. Prediction of citrus yield from airborne hyperspectral imagery, *Precision Agriculture*, **8**(3), 111-125
- 12) Akita, T., Sakai, K., Iwabuchi, Y., Hoshino, Y. and Ye, X., 2008. Spatial autocorrelation in masting phenomena of *Quercus serrata* detected by multi-spectral imaging. *Ecological Modelling*, **215**(1-3):217-224,