

令和元年9月9日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C) (特設分野研究)

研究期間：2015～2018

課題番号：15KT0112

研究課題名(和文) 数理農学創生へ向けた植物繁殖同調現象のメカニズム解明と生産管理論の構築

研究課題名(英文) Towards Math-Agro Science -Mathematical Analysis and Control on Alternate Bearing and Synchronization-

研究代表者

池口 徹 (IKEGUCHI, TOHRU)

東京理科大学・工学部情報工学科・教授

研究者番号：30222863

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、農学における種々の未解決課題を、数理科学の知見と技術を用いて解決するためのフレームワーク「数理農学」を構築するものである。特に本課題では、非線形数理科学でその理論が急速に発展している非線形自律振動子の同期現象について、またその中でも特に注目されている共通ノイズ同期現象を課題解決のための手法として適用することで、これらの課題を数理の立場から解決しようとするものである。具体的には、植物が示す繁殖同調現象のメカニズムについて、特に、印加する共通ノイズについて相互相関は高いものの必ずしも1とはならない共通ノイズを採用することで明らかに、同期度の変化特性を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本課題の学術的意義は、数理科学の力を用いて農学における種々の課題を解決しようとする新しい枠組みである「数理農学」を構築するところにある。また、農学は非常に重要な実学の一分野であり、例えば、我々の食生活と直接につながるなど、本分野における種々の課題はまさに社会的な意義を有している。本研究課題では、種々の解決すべき課題の中でも特に、植物の隔年結実現象に着目した。その際、非線形振動子の同期現象に関する理論を適用することで、植物の隔年結実現象のメカニズムを解明しようとしている。本課題では、隔年結実現象の数理モデル以外の多様な非線形力学系に対しても検討しており、この意味で本課題は学術的意義を有している。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research project is to construct a basic framework of "math-agro science," which treats several unresolved issues in the field of agriculture by using methodologies of mathematical science. In particular, in this project, we resolve an issue of synchronization in plants, which is called "alternate bearing." The alternate bearing is a synchronization of fruit bearing in which the volumes of product increases or decreases every two years.

In this project, this phenomenon is modeled by applying the theory of common noise synchronization phenomenon of nonlinear oscillators.

The results clearly show that the proposed models can reproduce the alternate bearing and synchronization, which indicates that using the proposed framework in this project, we can analyze and control the alternate bearing and synchronization.

研究分野：数理農学

キーワード：数理農学 非線形科学 同期現象 数理モデル 隔年結実現象

1 研究開始当初の背景

脳内の神経細胞の異常活動が引き起こす癲癇，サンゴの一斉産卵，ホタルの集団発光などの昆虫・動物の群行動，天体の自転と公転の周期性など，一見共通点の無いこれらの現象の背後には，結合振動子の同期現象と呼ばれる共通の力学構造が存在することが示されている．結合振動子の同期現象に関する理論研究・実証研究は，ホイヘンスの振り子時計による同期現象の発見以来，300年以上の歴史を有している．この中でも，最近20年間の非線形力学系理論に基づく同期現象の研究は目覚ましい発展を遂げている．これらの研究により，リミットサイクル振動子とカオス振動子の結合系に対する詳細な同期解析が行われ，同期の分類（完全同期，一般化同期，位相同期，時間遅れ同期），同期に至るルート，同期の発生条件などが数理的に明らかにされている．これに対して，近年では，共通ノイズ同期現象と呼ばれる従来とは異なるタイプの同期現象も発見されている．共通ノイズ同期現象についても，白色ノイズ，有色ノイズを印加した場合，リミットサイクル振動子，カオス振動子を用いた場合などの解析が，理論的・実験的に行われている．

一方，農学分野においては，植物個体の開花期や結実期とその量が多数の個体間で同調しながら著しく年変動し，植物集団がその種特有のリズムで豊作と凶作の年を繰り返す現象の存在が知られている．このような植物の繁殖同調現象の物理的メカニズムを説明するために提案された数理モデルとして，Isagiらによる資源収支モデル (Isagi et al, "How Does Masting Happen and Synchronize," J. Theor. Biol., **187**(2), 231-239, 1997) がある．資源収支モデルでは，「植物内部において資源が貯蔵され，貯蔵量がある閾値を超えると投資され，これにより開花・結実する」と仮定することで，現象を説明している．資源収支モデルは，決定論的カオスを含む種々の非線形ダイナミクスを再現できるという特徴を有するが，直接的観測が難しい植物内部の資源量に着目しているため，その実証性の証明には困難性が伴うという問題も有している．

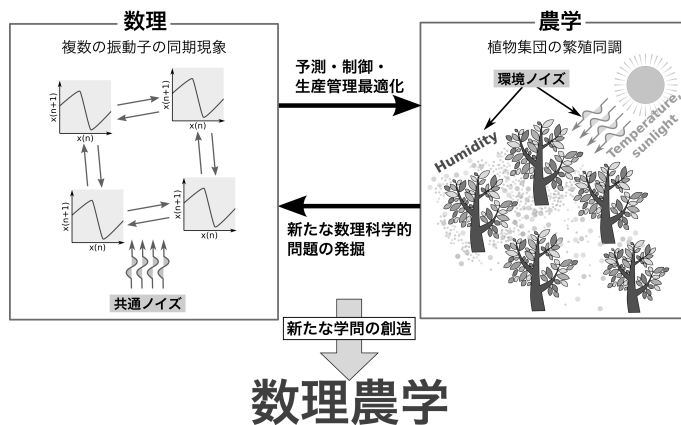


図 1: 非線形振動子の同期現象と植物集団の繁殖同調現象には，相互結合同期，共通ノイズ同期という共通の数理構造が存在している．

これらの事実より，(1) 非線形科学における振動子の同期現象と，植物集団の繁殖同調現象には，共通の数理構造が存在していること，従って，(2) 近年注目されている複雑ネットワーク理論も導入することで，植物集団の繁殖同調現象の内部メカニズムを解明し，これを再現する革新的な数理モデルを構築できること，さらには，(3) 提案した数理モデルを用いれば，植物の繁殖同調現象が制御可能であり，生産管理に関する理論が新たに構築できると考えられる (図 1)．

2 研究の目的

本研究課題では，上記のような研究の学術的背景と応募者のこれまでの研究成果に鑑み，近年，非線形科学分野で急速に発達した振動子系における同期現象と，農学分野における植物集団の繁殖同調現象に共存する数理構造の解明を通じて，全く新しい植物集団の繁殖同調現象の数理モデルを構築することを目的とする．さらに，提案した数理モデルを用いて，農作物の生産管理自動化に向けた新たな理論を構築することが眼目である．

数理科学的アプローチを農学分野に積極的に導入することで，数理農学とも呼ぶべきフロンティアを形成するとともに，その理論的基盤を構築する．

本研究課題では，近年非線形科学分野で多大な注目を集める振動子系における同期現象と，農学分野における植物集団の繁殖同調現象に共通の数理構造が存在することを明らかにするとともに，農作物の生産管理自動化に向けた新たな理論を構築する．これは，本研究課題の学術的かつ独創的特徴である．また，本研究課題による同期・同調現象における数理科学的共通構造の解明および数理科学的方法論の有効性の実証は，農学分野における数理科学的アプローチに基づく研究をさらに加速させ，数理農学とも呼ぶべき新理論の創出が大いに期待される．

さらに，植物の生態における数理科学的共通構造を発見し，そのメカニズムを明らかにすることは，農作物の収穫期や収穫量などの生産管理の半自動化を実現し，大量生産が可能で，かつ人件費を大幅に削減した農作物工場を現実のものとするための大いなる一歩でもある．

これは農村地域の高齢化および後継者不足という深刻な問題を抱える現代日本の農業の急速な衰退に歯止めをかけ、新たな生産管理技術を創出する足がかりとなる。この意味において、本研究課題の遂行ならびに成功は、今まさに時代が求めるものである。

3 研究の方法

1. 非線形力学系理論に基づく植物の開花・結実メカニズムの数理解モデル化

直接的に観測可能な光合成や栄養塩吸収による資源などの植物への入力データと結実量などの出力データを、非線形力学論的観点から解析することで、植物内部の資源の振る舞いを数理解モデル化する。これらの結果に基づいて、Isagiらのモデルの妥当性を検証しつつ、内部メカニズムを再現可能な新しい数理解モデルを構築する。

2. 同期理論に基づく多数の植物個体間の開花・結実期の同調メカニズムの解明

植物の個体間で開花期・結実期・結実量の同調には、花粉を介した他個体との相互作用と日射量・気温・湿度・風向・土壌の栄養塩量(環境ノイズ)などの圃場環境等、種々の要因がある。これらの植物個体間の相互作用や環境ノイズの影響による同調現象は、非線形振動子の相互作用による同期現象とp非結合振動子への共通ノイズ入力によって生じる共通ノイズ同期現象に、各々対応する。本項目では、植物繁殖同調現象に、これらの数理解構造が埋め込まれていることを明らかにし、数理科学的観点からその内部メカニズムと同期現象の関係性を解明する。

4 研究成果

4.1 一斉開花結実現象

ある種の多年生植物個体群で、周辺の個体と示し合わせたように一斉に開花・結実し、その後しばらく凶作あるいは並作の年が続くことが確認されている。これはマスティング、あるいは一斉開花結実などと呼ばれている。

隔年結実とは、生り年と不生り年が交互に繰り返される現象をいう。果樹では枝の一部で果実を形成しながら、同じ枝の一部で翌年の花芽が形成されている。そのため、過剰に果実を生産すると、養分がその分消費されてしまい、翌年の花芽形成が貧弱になる。果樹によって隔年結実の度合いは異なり、リンゴ、セイヨウナシ、クリ、クルミ、カキ、カンキツ類、熱帯・亜熱帯果樹などで品種により強い隔年結実性を示す。例えばカンキツ類のウンシュウミカンは、花粉の有無によらず実をつける単為結実性を持つにも関わらず隔年結実の度合いは顕著である。

図2は県別のミカン収穫量の推移である。年ごとに概ね隔年で上下に変動しており、県をまたいで変動に若干の相関があることが見て取れる。

こうした隔年結実が果実生産を不安定にする。例えばミカンの場合、隔年結実によりほぼ1年ごとに高単収(単収 = 生産量 ÷ 結果樹面積)と低単収を繰り返しており、1年おきに価格は上昇と下落を繰り返している。こうした振幅の大きさはミカン経営を不安定にする要因の一つである。

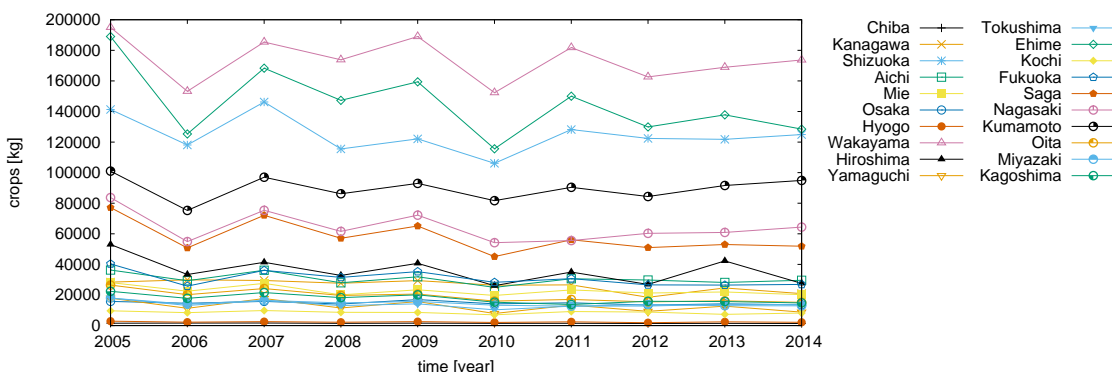


図 2: ミカンの生産量の推移

4.2 自家受粉する木のための資源収支モデル

井鷲らによって提案された資源収支モデルを式(1)に示す。

$$S(t+1) = \begin{cases} S(t) + P_S & \text{if } S(t) + P_S \leq L_T \\ S(t) + P_S - a(R_C + 1)(S(t) + P_S - L_T) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

光合成によって成熟した木は毎年資源の純生産量 P 、種子生産のための閾値 L_T 、 t 年の資源を $S(t)$ 、 R_C は結実のコスト、 $a > 0$ は定数である。

4.3 他家受粉する樹木のための結合系の資源収支モデル

他家受粉する樹木は他個体の花粉生産量の影響を受けると考えることができる。非結合系であった先ほどの式 (1) において、 $Y_i(t) = (S_i(t) + P_S - L_T)/P_S$ 、 $k = a(R_C + 1) - 1$ とすると、式 (2) のように書き換えられる。ここでは複数の木々の相互作用を考えるため、各木々を表すインデックス i を用いてそれぞれの木の資源を表している。

$$Y_i(t+1) = \begin{cases} Y_i(t) + 1 & \text{if } Y_i(t) \leq 0 \\ -kY_i(t) + 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

k は種子生産した場合、資源がどれくらい減るかを意味しており、減少係数と呼ぶ。

他家受粉する木々では、自分以外の木の花粉の量によってその年の生産量が左右されることが予想される。そのため他の木の花粉供給量

$$P_i(t) = \left(\frac{1}{N-1} \sum_{j \neq i} [Y_j(t)]_+ \right)^\beta \quad (3)$$

が花粉生産に影響するようにモデルを変更する。

$$Y_i(t+1) = \begin{cases} Y_i(t) + 1 & \text{if } Y_i(t) \leq 0 \\ -kP_i(t)Y_i(t) + 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

ここで、

$$[Y_j]_+ = \begin{cases} Y_j & \text{if } Y_j > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

であり、 β を結合係数、 k を減少係数と呼ぶ。

4.4 ノイズの付加

自然界において、樹木は日光や風雨など様々な環境変動の影響を受ける。そこで資源収支モデルをより現実的なものにするために、また共通ノイズ同期現象による同期を期待して、木々に環境変動を共通ノイズとして与えることを試みる。しかし現実には全ての木が全く等しい影響を受けるわけではない。近い距離にあればより似た環境変動を、距離が離ればより異なる環境変動を受けることが予想される。そこで完全に等しくはない、相関を持つ共通ノイズを木々に与える。

モデルの式では光合成による取得エネルギー P_S が毎年加えられている。これに環境変動として共通ノイズを与える。減衰項とノイズ ξ を付加したモデルを以下に示す。

$$S_i(t+1) = \begin{cases} A_i(t) & \text{if } A_i(t) \leq L_T \\ A_i(t) - a(R_C + 1)(A_i(t) - L_T) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

ただし、 $A_i(t) = \alpha S_i(t) + P_S + w\xi_i(t)$ とおいている。 $\alpha = 1.0$ とすることで前年の資源が減少しない場合を、また $w = 0.0$ とするとノイズを加えない場合を表現することができる。与えるノイズは正規乱数に設定し、木 i, j に与えるノイズ ξ_i, ξ_j の相互相関を $c_{ij} = E[\xi_i, \xi_j]$ とおく。

ノイズ $\xi_i(t)$ の相互相関 c_{ij} を変化した際の $C_i^{(a)}(t)$ の相関係数の推移を図 3 に示す。この結果から、ノイズの相関を高くするだけでなく、減衰率が $\alpha < 1$ であるとき、つまり資源の減衰がある場合に結実量が同期する傾向にあることが示唆される。

5 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 11 件) (全て査読有)

1. Ryota Nomura, Ying-Zong Liang, Kenji Morita, Kantaro Fujiwara, and Tohru Ikeguchi, Threshold-Varying Integrate-and-Fire Model Reproduces Distributions of Spontaneous Blink Intervals, PLoS ONE, 13(10): e0206528. 2018, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0206528>

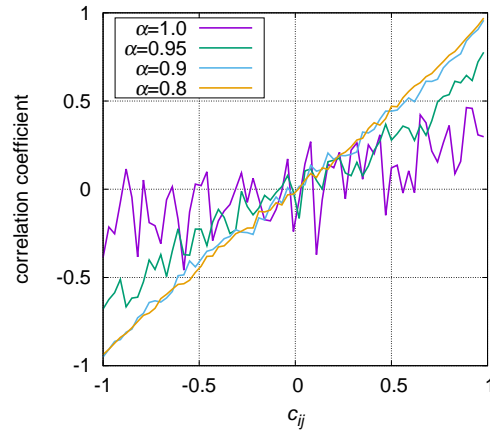


図 3: 与えるノイズの相互相関 c_{ij} を変化させた際の, 結実量 $C_i^{(a)}(t)$ の相関係数の推移

2. 内木楓, 島田裕, 藤原寛太郎, 池口徹, Izhikevich ニューロンモデルにおけるカオス応答とカオス同期, 電子情報通信学会論文誌 A, Vol.J100-A, No.5, pp.195-204, 2017, http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=j100-a_5_195&category=-A&year=2017&lang=J&abst=
3. Toshihiro Kobayashi, Yutaka Shimada, Kantaro Fujiwara and Tohru Ikeguchi, Reproducing Infra-Slow Oscillations with Dopaminergic Modulation, Scientific Reports, 7:2411, 2017, <https://doi.org/10.1038/s41598-017-02366-z>
4. Hikaru Ohnishi, Yutaka Shimada, Kantaro Fujiwara and Tohru Ikeguchi, Chaotic Neurodynamical search with small number of neurons for solving QAP, Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE, Vol. 8, No. 3, pp. 255-265, 2017, <https://doi.org/10.1587/nolta.8.255>
5. Awadhesh Prasad, Kenshi Sakai, Yoshinobu Hoshino, Direct coupling: a possible strategy to control fruit production in alternate bearing, Scientific Reports, Vol.7, No.39890, 2017, <https://doi.org/10.1038/srep39890>
6. Kenshi Sakai, Shrinivasa K. Upadhyaya, Pedro Andrade-Sanchez and Nina V. Sviridova, Chaos emerging in soil failure patterns observed during tillage: Normalized deterministic nonlinear prediction (NDNP) and its application, Chaos, Vol.27, No.033115, 2017, <https://doi.org/10.1063/1.4978027>
7. Yutaka Shimada, Yoshito Hirata, Tohru Ikeguchi, Kazuyuki Aihara, Graph distance for complex networks, Scientific Reports, Vol. 6, No. 34944, 2016, <https://doi.org/10.1038/srep34944>
8. Yutaka Shimada, Emiko Takagi, and Tohru Ikeguchi, Symmetry of Lyapunov Exponents in Bifurcation Structures of One-Dimensional Maps, Chaos, Vol.26, No.123119, 2016, <https://doi.org/10.1063/1.4972401>
9. Hideyuki Kato and Tohru Ikeguchi, Oscillation, Conduction Delays, and Learning Cooperate to Establish Neural Competition in Recurrent Networks, PLoS One, Vol. 11, No. 2, e0146044, 2016, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0146044>
10. 池口徹, 同期をつかさどる非線形性, 電子情報通信学会誌, Vol.98, No.11, pp.1002-1006, 2015, http://www.journal.ieice.org/summary.php?id=k98_11_1002
11. Awadhesh Prasad, Kenshi Sakai, Understanding the Alternate Bearing Phenomenon: Resource Budget Model, Chaos, Vol.25, No.123102, 2015, <https://doi.org/10.1063/1.4936673>

[学会発表] (計 14 件)

1. Sakura Rai, Mayu Aoki, Yutaka Shimada, Kantaro Fujiwara, and Tohru Ikeguchi, Investigation of ISO Generated by Dopaminergic Modulation and Inhibitory Synaptic Learning, Proceedings of the 4th International Conference on Mathematical NeuroScience (ICMNS2018), 2018.
2. Tohru Ikeguchi, Yutaka Shimada, Kantaro Fujiwara, Sakura Rai, and Toshihiro Kobayashi., Synaptic Dynamics in ISO by Dopaminergic Modulation and Inhibitory Synaptic Learnings, Proceedings of the 2018 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2018), 2018.

3. Misa Fujita, Takayuki Kimura, Kantaro Fujiwara, and Tohru Ikeguchi, Solving the Steiner Tree Problem in Graphs Using the Key-Path Based Neighborhood with the k th Shortest Path, Proceedings of the 2018 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2018), 2018.
4. Kohei Yamamoto, Yutaka Shimada, Kantaro Fujiwara, and Tohru Ikeguchi, Nonlinear Analysis on Temporally High Resolution Data of Stock Markets in Japan, Proceedings of the 2018 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2018), 2018.
5. Shiki Kanamaru, Yutaka Shimada, Kantaro Fujiwara, and Tohru Ikeguchi, Nonlinear Time Series Analysis on LOTO7, Proceedings of the 2018 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2018), 2018.
6. 栗田いずみ, 島田裕, 藤原寛太郎, 池口徹, 有色ノイズによるカオス写像の共通ノイズ同期現象に関する一検討, 電子情報通信学会 2018 年ソサイエティ大会, 2018.
7. Misa Fujita, Takayuki Kimura, and Tohru Ikeguchi, Solving the Steiner Tree Problem in Graphs by Chaotic Neural Network using Key Path Neighborhood, Proceedings of the 12th Metaheuristics International Conference(MIC 2017), 2017.
8. Kantaro Fujiwara, Hiroyasu Ando, Tohru Ikeguchi, Masashi Yoshida and Masafumi Kakei, Mathematical Model of TRPM2 Activation in Pancreatic β -cells, Proceedings of the 2017 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2017), 2017.
9. Misa Fujita, Yutaka Shimada, Kantaro Fujiwara and Tohru Ikeguchi, Evaluation of the performance of the chaotic neural network for solving the Steiner tree problem in graphs with incidence costs, Proceedings of the 2017 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2017), 2017.
10. Mayu Aoki, Yutaka Shimada, Kantaro Fujiwara and Tohru Ikeguchi, Effect of connectivity weights of inhibitory neurons in neuronal avalanches, 2017 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2017), 2017.
11. 栗田いずみ, 島田裕, 藤原寛太郎, 池口徹, 環境変動を考慮した資源収支モデルによる一斉開花・隔年結実現象, 電子情報通信学会 総合大会, 2017
12. Kenshi Sakai and Yoshinobu Hoshino, Spatial Dynamics of Acorn Masting and Tree Crops Alternate Bearing, 2016 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2016), 2016.
13. Awadhesh Prasad and Kenshi Sakai, Understanding the some aspects of Alternate Bearing Phenomenon: In-phase and Out of Phase Synchronization, 2016 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2016), 2016.
14. Kenshi Sakai and Nina Sviridova, Common noise induced synchrony on coupled and uncoupled oscillators: Case studies for Citrus alternate bearing and Acorns, 2015 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2015), 2015.

6 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 酒井 憲司
 ローマ字氏名: SAKAI, Kenshi
 所属研究機関名: 東京農工大学
 部局名: 農学研究院・農業環境工学部門
 職名: 教授
 研究者番号: 40192083

(2) 研究分担者

研究分担者氏名: 島田 裕
 ローマ字氏名: SHIMADA, Yutaka
 所属研究機関名: 埼玉大学
 部局名: 大学院理工学研究科・数理電子情報部門
 職名: 助教
 研究者番号: 50734414

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。