

令和 6 年 6 月 13 日現在

機関番号：12605

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2020～2023

課題番号：20K21347

研究課題名(和文) 多年生樹木における豊凶同期理論の体系的確立

研究課題名(英文) development of Masting Synchronization Theory

研究代表者

酒井 憲司 (Sakai, Kenshi)

東京農工大学・(連合)農学研究科(研究院)・特任教授

研究者番号：40192083

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,900,000円

研究成果の概要(和文)：果樹や森林樹木の果実および堅果(ドングリ)の生産量は個体ごとに大きく変動する。さらに、これらの樹木個体群は種子・果実生産において豊凶同期現象を呈する。樹木集団の同期メカニズムとしては、花粉による間接結合、共通ノイズそして生理融合による直接結合の3者が知られており、樹種と生育環境によってこれらが複合する。本研究ではこれらを統一した農協モデルを構築するとともに、ピスタチオ、コナラ・ブナ・ミズナラそしてウンシュウミカンの豊凶データによって検証する。また、豊凶現象に有効な位同期解析手法を提案し、豊凶データの定量的分析や数理モデルのパラメータ推定に有効であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

樹木堅果および果樹における豊凶同期現象のメカニズム解明は、森林管理、野生動物管理、果樹栽培の効率化などの官憲から重要である。豊凶同期の要因として、花粉結合、微気象による共通ノイズ、植物体同士の何らかの生理融合、およびそれらの組み合わせと考えられる。これらを統一的に記述する数理モデルと実データの空間位同期解析手法によって、豊凶変動の時空間同期メカニズム解明に有効である点で学術的意義が高い。また、決定論的非線形予測手法による翌年の収量予測、また、同期強度の広域分布の推定など社会的課題解決に有用な手法であり社会的意義も高い。

研究成果の概要(英文)：Three types of synchronisation mechanisms are known for tree populations (masting/alternate bearing): indirect coupling by pollen, common noise and direct coupling by physiological fusion. In this study, a unified cooperative model is developed and validated using yield data from Pistachio, Quercus serrata, Beech, Quercus and Citrus Mandarin. In addition, a phase analysis method is proposed, which is effective for the quantitative analysis of masting/alterane bearing data and the estimation of parameters of the developed models.

研究分野：農業機械学

キーワード：豊凶同期 時空間カオス 拡散結合 隔年結果 隔年結果 ピスタチオ コナラ ウンシュウミカン

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

多年生植物においては、種子生産量に豊凶同期が存在することが知られている。樹木作物としては柑橘・落葉広葉果樹・ナッツ類・ベリー等、森林樹種としてはブナ・ミズナラ・コナラ等と広範にわたる。これら多様な植物種によって、2周期・3周期・多周期共存・不規則変動・間欠変動と多彩な挙動が呈される。果樹生産量における豊凶同期(隔年結果)は市場価格変動を伴うため、生産、経営、流通においてコスト要因となり果樹経営のリスク要因となっている。また堅果(ドングリ)豊凶(マスティング)は、野生動物管理、森林の天然更新、里地・里山保全、耕作放棄地の管理等と深い関係があり、堅果豊凶予測は課題解決に極めて重要である。しかし、樹種毎に変動の周期、同期強度、地域的広がりなどが多様であるため、分野横断的な学際研究や技術開発のためには共通の理論と方法が必要とされていた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、多年生樹種に統一的に適用可能な豊凶同期理論の確立と、これを果樹生産・樹木生産に活かすために必要な解析手法を整備することである。特に、植物個体間の地下部における物質交換機能と、遺伝子発現~個体集団~広域(10km-500km)といったスケールを超えて統一的に記述できる豊凶同期モデルの構築を目的とする。これを達成するため、①豊凶同期モデルの構築、②位相同期解析手法の提案、③コナラ・ブナ・ミズナラ豊凶データの調査、④ウンシュウミカン接ぎ木試験および栽培試験さらに⑤アンサンブル非線形時系列予測に豊凶データへの適用可能性の検証、の5課題を実施した。

3. 研究の方法

ピスタチオ(カリフォルニア大学デービス校)、コナラ・ブナ・ミズナラ(兵庫県森林野生動物研究センター)、ウンシュウミカン(東京農工大学附属果樹園)で取得した豊凶データに基づいてこれらを統一的に記述可能な数理モデルを構築し、実データにおける豊凶同期の解析及びモデルパラメータ推定に位相同期解析手法を提案した。

(1) 豊凶同期モデル

①主要な同期メカニズムの数理モデルの構築

樹木豊凶同期のモデルとして物質収支モデル(RBM)が有力な標準モデルである(Isagi et al. JTB 187, 1997)。RBMを基本として、花粉による大域結合/局所結合を数理モデルI、共通ノイズ同期を数理モデルII、根接ぎや接ぎ木による融合体の同期を数理モデルIIIによって定式化し、さらにこれらを組み合わせることによって、植物種に応じた多彩な豊凶同期を統一的に記述した(図1)。

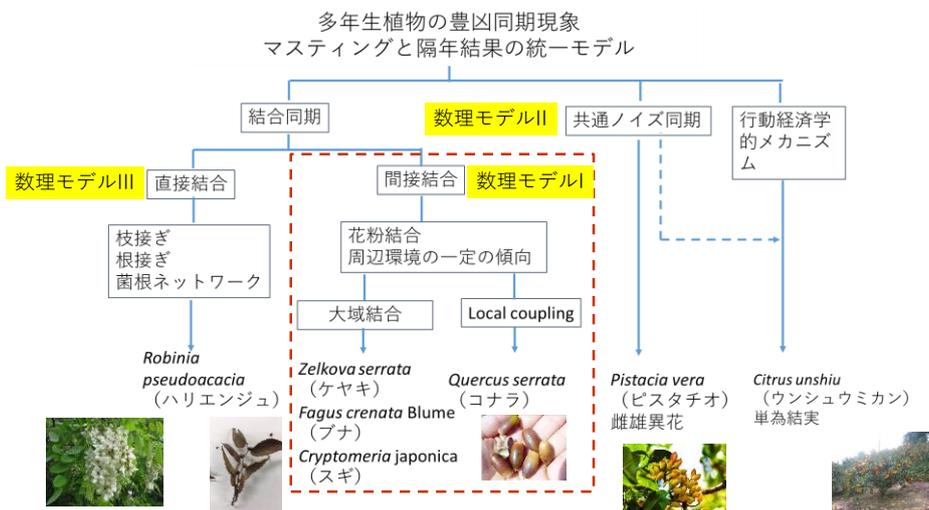


図1 樹木豊凶同期モデル

②数理モデルの検証

○数理モデルI(花粉結合):ブナ, ミズナラ, コナラのデータを用いて検証した。○数理モデルII(共通ノイズ):カリフォルニア大学デービス校提供のピスタチオ果樹園(9,526本)における微気象変動を想定した共通ノイズ同期とした。2次的要因として根系ネットワークの存在を仮定して菌根ネットワークも組み込んだ

○数理モデルIII(生理融合):個体間を地上部または地下部で生理融合させた融合体を作成し、これら2種類の結合様式について検証試験を行う。材料として鉢植え栽培において2個体ウンシュウミカンを一つのポットに栽培した。両個体のシュートを接いだ地上部融合体(接ぎ木)を作成するとともに、土壤に仕切り板の有無により、地下部での融合体の作出も試みた。栽培試験は、東京農工大学附属果樹園にて行った。RBMを振動子として樹木個体群における3つの同期要

因, 花粉結合 (数理モデル I), 共通ノイズ (数理モデル II), 拡散結合 (数理モデル III および, それらの組み合わせにより実在の豊凶データで検証を行った. ピスタチオなどの雌雄異株の樹種の同期の第 1 要因は, 微気象変動などの外乱が果樹園内の各個体に同一に作用すると仮定し共通ノイズを導入した. 制御パラメータである RC が 2 より小さく 1 に近づけば, 共通ノイズにおいても強い同期が確認できた. ピスタチオ果樹園における収量の空間分布にべき乗則をとまなう顕著な長距離相関の存在していることから, 近接相互作用の存在が明らかとなったため, 根系ネットワークによる個体間の物質交換を仮定し近傍個体間の拡散結合による結合写像格子として定式化した. なお, ピスタチオにおける根系ネットワークにおいて定式化した拡散結合では同相同期となるが, 拡散結合がおこる生活史上のタイミングが異なれば逆相同期にもなる[4].

(2) 位相期解析手法

樹木豊凶同期の位相解析はウンシュウミカン, ケヤキ, ピスタチオの収量データやスギ・ヒノキ花粉量データに対して有効であった. 2つの振動子の位相は同相と逆相の2つの状態を取るものとする. 集団内のすべてのペアについてともに増減が同じ場合は同相, 逆の場合は逆相とする. 同相を 1、逆相を 0 として個体が集団の中での同相割合を計算する. 集団全体の同相割合を計算することで, 集団の同期強度とする[1].

マスタングや各県結果においては, 個体の豊凶変動が林分や果樹園の個体群において同期する. そこで, 対象とする個体の収量時系列を時系列集合として取扱う. 時系列集合の同相・逆相解析によって, 各個体が集団全体においての同期割合を算出する.

$$A = \{x_i(t), i = 1, 2, \dots, M; t = 1, 2, \dots, N\} \quad (1)$$

$x_i(t)$ を個体 i の t 年における生産量とする. 個体 i と個体 j において $\phi(i, j, t)$ を(2)式で定義する.

$$\phi(i, j, t) = \{x_i(t + 1) - x_i(t)\} \{x_j(t + 1) - x_j(t)\} \quad (2)$$

i と j の同相と逆相の割合を(3)式と(4)式で定量化する.

$$IN_{i,j}(t) = u(\phi(i, j, t)) \quad (3)$$

$$OUT_{i,j}(t) = u(\phi(i, j, t)) \quad (4)$$

これらを用いて, 個体および集団の同期強度を定量化する.

4. 研究成果

(1) ピスタチオ豊凶の時空間同期解析[1]

ピスタチオは換金作物としてカリフォルニア州での栽培が盛んである. 強い同相同期を呈し, 州全体の収穫量からも 2 年周期の隔年結果が顕著に観察できる. ピスタチオは雌雄異株であり, 雌株に十分な花粉が供給されるように雄株が一定間隔で配置されている. 当該の果樹園は東西 777m, 南北 416m で 9, 526 本の個体が 5.2m × 6.4m で配置されている. 雄株は 26m 間隔で配置され, すべての雌株は雄株から 14m 以内に存在し十分な花粉が供給されている. そのため, 花粉結合による同期ではなく, これまで共通ノイズ同期としてモデル化してきた. ところが, 収量の空間分布に強い距離相関の存在が確認された. Ising モデルによるアナロジーから, 当該果樹園において近接する個体間に相互作用, 例えば, 根系ネットワークによる物質交換の存在が示唆された. これを受けて, RBM に拡散結合を追加することで, RBM の結合写像格子 (Kaneko PRL65, 1990) における共通ノイズ同期モデルを構築した[1]. また, モデルパラメータ推定は, 同相同期強度を評価関数としたパラメータスタディを実データによって評価して行った.

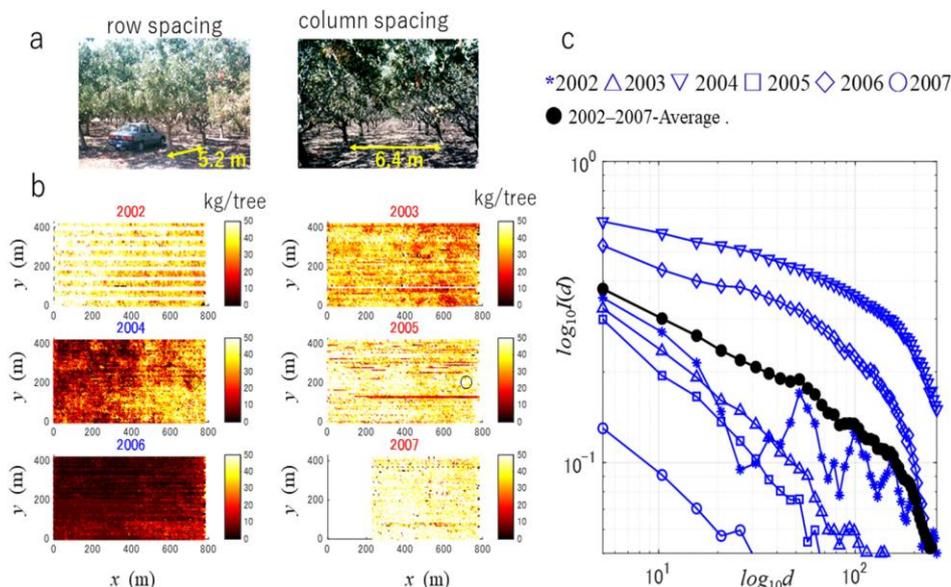


図 2 ピスタチオ果樹園における豊凶同期の時空間分布と距離相関[1]

(2) ウンシュウミカン接ぎ木融合体における位相同期[5]

個体間を地上部または地下部で生理融合させた融合体を作成し、これら2種類の結合様式について検証試験を行った。材料として鉢植え栽培のウンシュウミカンを供試し、各個体から発生した主枝同士を接いだ(ジョイント仕立て)地上部融合体(III-a)と主根同士を接いだ(根接ぎ)地下部融合体を作成する。これら融合体を東京農工大学附属果樹園にて栽培試験を行った。栽培試験は30個体のウンシュウミカンによって対象区と接ぎ木区を設定して行った。2022年の接ぎ木当年と翌年2023年の推移は、Prasadモデルの予想とは逆に、2022年には接ぎ木区において15/16が欠果となった。2023年春にはそれらは全て開花し着果し2023年秋に果実数を計測する。接ぎ木後1年現在においては、同相同期への引き込みが生じたように見えるが、今後の結実過程を継続的に観測する必要がある。すべての個体がOFFとなる予想外の結果である。また同相同期を発生させるタイプの拡散結合RBM(Sakai et al 2022)によっても、この予想外の結果を十分に説明できなかった。隔年結果やマस्टィングをカオス振動子の集団力学としてみた場合にも、この現象は極めて特徴的かつ特異でありそのメカニズム解明が学術的にも重要である。そのため、現有の試験結果に適合する新たなRBMとして花成誘起阻害型RBMを考案し、数値実験結果と栽培試験結果を比較した。本稿で構築した花成誘起阻害型RBMの検証には、継続中の栽培試験から今後の結果を得なければならないが、現段階で得られている知見に限定しても、果樹栽培学と非線形力学、同期理論などに広く有益と考える[4]。

(3) 兵庫県コナラ豊凶の時空間同期解析[6]

ブナ、ミズナラ、コナラなど多くの堅果はマस्टィングと呼ばれる豊凶同期現象を呈する。上記樹種の豊凶指数の時系列集合に対して位相同期解析と距離相関解析を行うとともに、RBMの結合写像モデルにより考察を行った。同期強度の空間分布に関して2009-2010ではほぼ完全同期であった。2010年は観測史上最高の猛暑で全国的に樹種を超えての同期も検出されており、典型的な気象合図がコナラ広域豊凶データから明瞭に検出できている。コナラは2005-2013年までは兵庫県全域で同期が見られたが、2013年以降同期は喪失している。コナラの兵庫県全域193箇所17年間の豊凶指数データから3kmを超える1ディケードにおいて冪法則の距離相関が存在する。2005-2013では距離相関が高く2013-2021では距離相関が低い。標高と同期強度の関係コナラは2013年以前は標高に関わらず同期を示したが、2013年以降は400m以下では同期喪失、400m以上では強い同期が発生し相転移が起きている。ブナは完全同期に近い強い同期強度を示した。3種ともに2年周期が最大の周期成分であったが、ミズナラ・コナラは2周期成分を第1成分としつつも3周期、4周期、5周期の成分を有しRBMが境界衝突分岐による周期増加分岐であることと整合している。ブナの2周期成分は卓越的で、そのほかには17年間に2回の4年周期のみで3年周期成分が存在しない。RBM結合写像モデルで花粉結合強度と花粉到達距離を考慮することによりこれらの解析結果を合理的に解釈出来た(図3)。

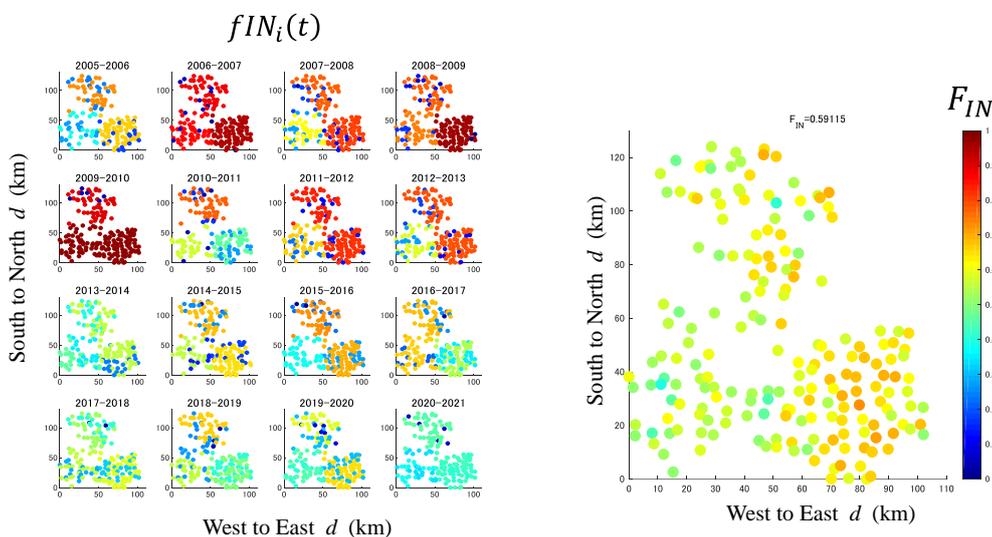


図3 コナラ豊凶における同期強度の時空間分布

(4) 樹木豊凶へのアンサンブル非線形予測の適用[2][3]

果樹の豊凶データは一個体ごとに年1点しか得られないため、その時系列サイズは極めて小さい。しかし、幸いなことに、果樹園や林分内の個体数は数十から数万にも及ぶため、時系列集合のサイズを十分大きくすることが可能である。また、本研究においても示したように、多くの樹木・果樹の繁殖様式が低次元の非線形ダイナミクスを有していると仮定できることから、時系列集合からのダイナミクス再構成が可能となる。ここでは、最もシンプルな決定論的非線形予測法であるLorenz類推法によって、数点という極小サイズの時系列に対して、統計的手法に拠らず、決定論的非線形予測を応用した1年先収量予測の実践例を示すことができた。決定論的非線形

予測においては、Lorenz 類推法はその最初の提案であるが実データ応用には精度面で限界があるとされてきたようである。しかし、本研究で扱ったような森林樹木や果樹の豊凶集合データにおいて有用な予測精度を示したのは、樹木豊凶が外政要因に対して卓越的に強い内生的メカニズム（ダイナミクス）を有している証左といえる。

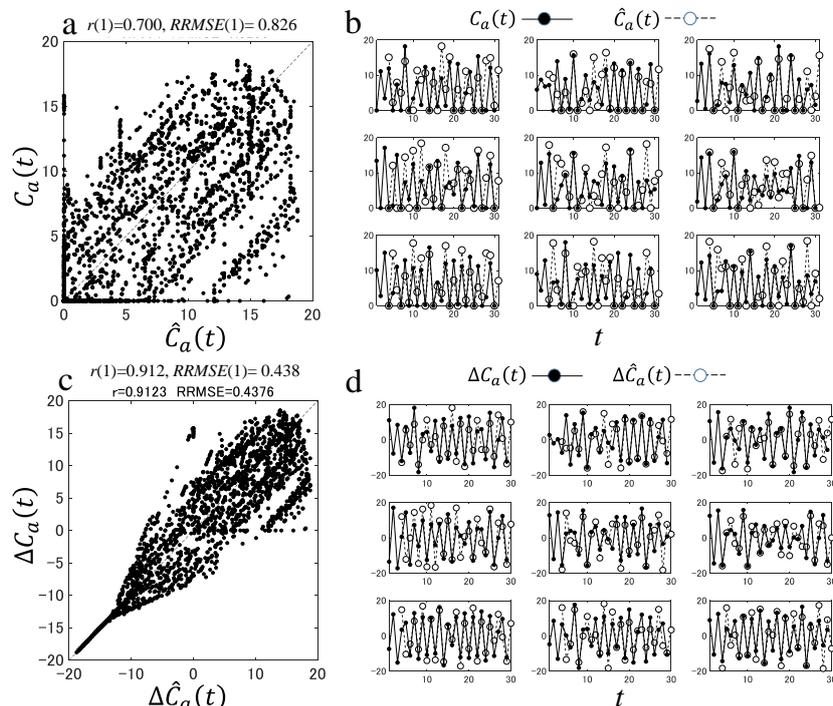


図4 Lorenz類推法による決定論的非線形予測
(ピスタチオモデルデータへの適用) [3]

位相同期解析は農業データにおいて個体もしくは観測サイトの相互間の年次増減のみで、同期強度を定量的に評価する。そのため、個体の収量そのものを高精度で得られなくとも、広域に分布する個体群もしくは観測サイト群においてリモートセンシングなどの間接的計測によることができる。衛星、航空だけではなくドローンにより低コストで広域データ・大規模個体群データの構築も可能である。また、データ解析による特性は把握だけではなく、多様な樹種においてもここで開発した統一の豊凶数理モデルと合わせて考察することにより、栽培管理、森林管理、野生動物管理および予測などの社会実装への要素技術として活用が期待できる。

引用文献

- [1] Kenshi Sakai, Patrick H. Brown, Todd S. Rosenstock, Shrinivasa K. Upadhyaya, Alan Hastings, Spatial phase synchronisation of pistachio alternate bearing: Common-noise-induced synchronisation of coupled chaotic oscillators, *Chaos, Solitons & Fractals*, 165, 112764, 2022
- [2] 酒井憲司. カオス同期に基づく自然への理解と農業応用, *電気学会誌*, 143(1), 29-32, 2023
- [3] 酒井憲司, 果樹豊凶の決定論的非線形予測 —アンサンブル再構成と Lorenz 類推法による 1 年先収量予測—, *統計数理*, 71, 129-148, 2023
- [4] Chauhan Swati, Dixit Shiva, Shrimali Manish Dev, Sakai Kenshi, Prasad Awadhesh, Constant Production in an Orchard: An interaction-based approach, *Chaos, Solitons & Fractals*, 181, 114639
- [5] 酒井憲司, 林勇歩, 森山裕充, 伴琢也, カンキツの隔年結果における遺伝子発現ダイナミクス, 関東農業食料工学会, 2021
- [6] 酒井憲司, 藤木大介, 梶光一, 兵庫県全域におけるドングリ豊凶の空間位相同期, 日本数理生物学会, 2023

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Kenshi Sakai, Patrick H. Brown, Todd S. Rosenstock, Shrinivasa K. Upadhyaya, Alan Hastings	4. 巻 165
2. 論文標題 Spatial phase synchronisation of pistachio alternate bearing: Common-noise-induced synchronisation of coupled chaotic oscillators	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Chaos, Solitons & Fractals	6. 最初と最後の頁 112764
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.chaos.2022.112764	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 酒井憲司	4. 巻 143(1)
2. 論文標題 カオス同期に基づく自然への理解と農業応用	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 電気学会誌	6. 最初と最後の頁 29-32
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejjournal.143.29	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 酒井憲司	4. 巻 71
2. 論文標題 果樹豊凶の決定論的非線形予測 アンサンブル再構成とLorenz類推法による1年先収量予測	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 統計数理	6. 最初と最後の頁 129-148
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Chauhan Swati, Dixit Shiva, Shrimali Manish Dev, Sakai Kenshi, Prasad Awadhesh	4. 巻 181
2. 論文標題 Constant Production in an Orchard: An interaction-based approach	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Chaos, Solitons & Fractals	6. 最初と最後の頁 114639 ~ 114639
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.chaos.2024.114639	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 Kenshi Sakai
2. 発表標題 Agrochaology-Chaos, Synchronizations and Networks-
3. 学会等名 数学を用いる生物学：理念・概念・実践と方法論 統計数理研究所（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 酒井憲司
2. 発表標題 農業機械と数理モデルー非線形数学、カオスー
3. 学会等名 諸科学集会（特別会） 統計数理研究所（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 酒井憲司，林勇歩，森山裕充，伴琢也
2. 発表標題 カンキツの隔年結果における遺伝子発現ダイナミクス
3. 学会等名 関東農業食料工学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kenshi Sakai
2. 発表標題 Large Scale Network Dynamics of Perennial Plants Population
3. 学会等名 農業食料工学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kenshi Sakai ,Daisuke Fujiki
2. 発表標題 Spatial synchronization of acorn and wild animals
3. 学会等名 農業食料工学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 酒井憲司、藤木大介、梶光一
2. 発表標題 兵庫県全域におけるドングリ豊凶の空間位相同期
3. 学会等名 日本数理生物学会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	藤木 大介 (Fujiki Daisuke) (30435896)	兵庫県立大学・自然・環境科学研究所・准教授 (24506)	樹木豊凶データの取得
研究 分担者	伴 琢也 (Bann Takuya) (20325046)	東京農工大学・農学部・准教授 (12605)	ウンシュウミカンの栽培試験
研究 分担者	森山 裕充 (Moriyama Hiromitu) (20392673)	東京農工大学・(連合)農学研究科(研究院)・教授 (12605)	ウンシュウミカンの栽培試験

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
米国	カリフォルニア大学デービス校			
インド	デリー大学			