

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 18 日現在

機関番号：10101

研究種目：新学術領域研究（研究領域提案型）

研究期間：2010～2014

課題番号：22119011

研究課題名（和文）植物システム制御の数理モデリング

研究課題名（英文）Modeling approaches to understand plant survival strategies under fluctuating natural environment

研究代表者

佐竹 暁子 (Satake, Akiko)

北海道大学・地球環境科学研究科（研究院）・准教授

研究者番号：70506237

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 53,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、数学モデルとコンピューターシミュレーションを積極的に活用することで、植物個体の生存成長戦略の分子メカニズムを理論的に明らかにすることを目的として、主に3つのテーマを推進した。（1）自然環境でみられる複雑な温度変化に应答する仕組みを明らかにし、遺伝子情報に立脚した開花時期予測モデルを開発した。（2）育種研究へ新たな数理的手法を提供することを目的に、イネのショ糖転流と玄米登熟を捉えた師管栄養輸送モデルを開発した。（3）植物が多様な明暗サイクルにどのように应答し計画的なデンプン利用を実現しているのか、そのメカニズムを明らかにする数理モデルを開発した。

研究成果の概要（英文）：In this study, we study three topics using the mathematical models and computer simulations. (1) We explored a mechanism to respond to a complex temperature change in natural environments, and have developed a flowering time prediction model based on genetic information. (2) To provide a new mathematical techniques to breeding research, we have developed a phloem transport model capturing sucrose transportation and grain filling in complex rice panicle structures. (3) We have developed a mathematical model to understand the starch management strategy under a variety of light-dark cycle.

研究分野：数理生物学

キーワード：植物 モデル化 生理学 遺伝子 環境

1. 研究開始当初の背景

固着性である植物は、移動して適した生育環境を選択することができない。その代わりに、生理や形態を柔軟に変化させることによって、自分を取り巻く環境に適応している。こうした植物の挙動を、さまざまな戦略の中で生涯にわたる繁殖成功を最大にする適応戦略だとみなし、工学や経済学で用いられてきた最適制御理論・ゲーム理論を用いて、数理的に解析する研究が盛んに行われてきた。例えば、植物は光条件や土壌環境に応じて地上部/地下部バランスを変化させるが、養分の分配を考慮した最適化モデルを解析することで、最も効率よく成長し種子を生産できる地上部/地下部バランスは何か？という問いに答えることが可能になる。

しかし、こうした進化生態学的数理モデルは、根や茎の伸長、気孔の開閉、栄養素の吸収や輸送といった成長/生存に関わるプロセスがどのように制御されているのか、その内的メカニズムをブラックボックスとして扱ってきた。一方、モデル植物を対象として、成長生存やストレス応答の分子メカニズムに関わる知見が急速に蓄積され、細胞分裂サイクルの制御や水や高温、そして酸性土壌などのストレス環境耐性に関わる遺伝子の同定や機能解析が進んでいる。このように各々の部分的なプロセスにおいて遺伝子やタンパク質の働きに関する知識が拡大してきた現在、部分的な知見を結びつける数理モデルを構築し、植物がいかに個体として生産性を高め多様な環境に適応しているのか、その植物システムの論理を明らかにすることが今後の課題である。こうした視点にたつて、これまで植物ホルモンオーキシンの輸送過程に焦点をあてた根伸長モデルや、形態形成過程の環境応答を表現した花序形成モデルが開発されてきた。

2. 研究の目的

そこで本研究は、数学モデルとコンピューターシミュレーションを積極的に活用することで、植物個体の生存成長戦略の分子メカニズムを理論的に明らかにすることを目的とする。具体的には以下の課題に取り組む。

自然環境でみられる複雑な温度変化のもとで植物がどのように季節の移り変わりに応答し適切な時期に開花できるのか、そのメカニズムを明らかにするとともに、遺伝子情報に立脚した開花時期予測モデルを開発する。

イネの玄米数や玄米配置を制御する遺伝子情報をもとに、収量の高い品種を作出するための育種研究が近年盛んに行われている。しかし、光合成能や成長期間は固定したまま玄米数のみを増加させていくと、各玄米の登熟度が低下し、総収量が減少することが報告されている。そこで、育種研究へ新たな数理的手法を提供することを目的に、イネのショ糖転流と玄米登熟を捉えた篩管栄養輸送モデルを開発する。

植物は日中生産した光合成産物の一部をデンプンとして蓄積し、それを夜間にショ糖に分解し様々な成長器官へ輸送することで昼夜問わず継続して成長している。植物が多様な明暗サイクルにどのように応答し計画的なデンプン利用を実現しているのか、そのメカニズムを明らかにする数理モデルを開発する。

3. 研究の方法

シロイヌナズナの近縁種である多年生草本ハクサンハタザオを対象にして、花成に関わる温度応答性を定量化するために、様々な温度条件のもとでFLCとその上流/下流に位置する遺伝子(VIN3とFT)の相対発現量を長期間観測する。観測データを用い

て、各遺伝子の温度応答関数を推定する。推定された温度応答関数を実装した動力学モデルを用いることで、どのような温度環境であっても*FLC*と*FT*の発現動態を予測する。開発した手法によって自然条件の植物の挙動を高い精度で説明できることを確認した後、温度が上昇した際の繁殖時期を予測する。

節部におけるショ糖転流の駆動力は、ショ糖濃度勾配によって生じる膨圧差によって生じると考える圧流説が現在支配的である。本研究でもこの圧流説を採用し、ソース葉と複数のシンク（玄米）が師管（エッジ）で連結されたグラフとして複合的師管ネットワークをモデル化し、各ソースとシンクにおけるショ糖ダイナミクスを離散空間常微分方程式系によって記述する。グラフの形状はコシヒカリの穂構造をもとに算出する。

デンプンとショ糖量変化の日周性を連立微分方程式によって定式化し、デンプンの分解速度は概日時計によって影響を受けると仮定したモデルを開発する。ショ糖量の日周変動を最小にするような分解速度関数を解析的に求める。

4. 研究成果

新しく開発されたモデルは、春化において重要な開花調節遺伝子 *FLC* 遺伝子とフロリゲンとして知られる *FT* 遺伝子という、たった二つの遺伝子で構成されたシンプルなモデルであるにも関わらず、複雑な自然条件で観察された遺伝子発現量の季節変化と、開花の開始および終了時期を精度良く再現することができた。将来の地球温暖化によって開花時期に生じる変化を予測したところ、開花の開始および終了時期の双方が温暖化とともに早期化することが示され

たが、開花終了時期の進みが開始時期よりも早く進むため、開花期間が温暖化とともに短縮され、最終的には約 5 の温度上昇によって開花すらしなくなることが予測された(図 1)。

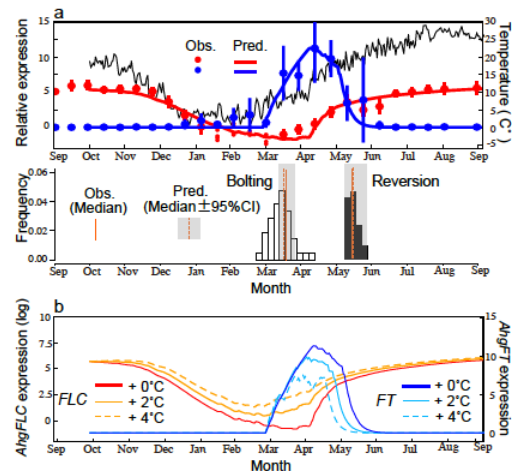


図 1: 環境変化への植物の開花時期応答の予測と検証。(a) *FLC* 遺伝子(赤)と *FT* 遺伝子(青)の相対発現量の季節変化と繁殖開始(抽だい, bolting)と繁殖終了(栄養成長への逆転, reversion)時期。線は予測値、点は実測値を示す。(b) 温度上昇への応答。

完全展開モデルをもとに、玄米数は固定し玄米配置のみが異なるイネ穂ネットワークを仮想的に3種類作出し、ネットワーク間で収量比較を行った。その結果、一次枝梗のみあるいは少数の二次枝梗を発達させたネットワークにおいて高い収量が予測されたが、三次枝梗まで発達させたネットワークでは未熟な玄米が認められ収量は低いままであった。また、高い収量が予測されたイネ穂ネットワークでは、ネットワーク上の全ての玄米が均質な登熟動態を示した(図 2)。総光合成速度を増加させた場合にも同様の結果が得られた。これらの結果は、均質なショ糖輸送が可能な玄米配置をデザインすることによって、収量増加を実現できることを示唆するものである。

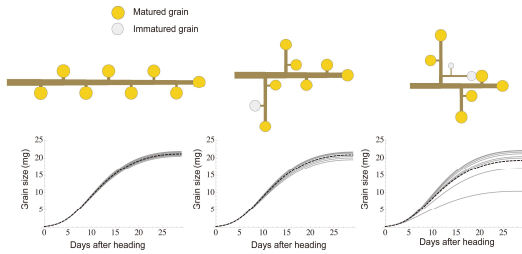


図 2: 3 種類の玄米配置ネットワークで予測された登熟プロセス. 実線は各玄米のサイズ変化を表しており、点線はその平均値 (mg)。

デンプン代謝モデルの解析により、デンプンの日周変化にみられる線形性は、葉内のショ糖量をほぼ一定に保つホメオスタシスの結果として実現されることが明らかとなった。また、デンプン分解速度は夜明けにピークを持つ双曲線関数で与えられるときに、ショ糖量は昼夜問わずほぼ一定に維持され、デンプン変化の線形性が実現されることが予測された。さらに、このデンプン分解速度がショ糖量に応答した概日時計の位相変化によって制御されると考えると、多様な日長においてもショ糖量を枯渇させず成長し続けると予測された。本研究によって、ショ糖に反応して朝には概日時計の位相が前進し夜には後退するという実証データの意義を、ショ糖ホメオスタシスの見解から説明することが可能となる。

< 引用文献 >

該当なし。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文 査読有](計 5 件)

1. Webb, A.A.R., Satake A (2015). Understanding circadian regulation of carbohydrate metabolism in Arabidopsis using mathematical models. *Plant & Cell Physiology*. 56, 586-593.
2. Seki M, Feugier FG, Song X, Ashikari M, Nakamura H, Ishiyama K, Yamaya T,

Ikeda M, Kitano H, Satake A (2015) A mathematical model of phloem sucrose transport as a new tool for designing rice panicle structure for high grain yield. *Plant & Cell Physiology* 56, 605-619.

3. Miyazaki Y, Maruyama Y, Chiba Y, Kobayashi MJ, Joseph B, Shimizu KK, Mochida K, Hiura T, Kon H, Satake A (2014) Nitrogen as a key regulator of flowering in *Fagus crenata*: understanding the physiological mechanism of masting by gene expression analysis. *Ecology Letters* 17, 1299-1309.
4. Satake, A, Kawagoe T, Saburi Y, Chiba Y, Sakurai G, Kudoh H (2013) Forecasting flowering phenology under climate warming by modelling regulatory dynamics of flowering-time genes. *Nature Communications* 4, 2303.
5. Feugier, F.G., and Satake A. (2013) Dynamical feedback between circadian clock and sucrose availability explains adaptive response of starch metabolism to various photoperiods. *Frontiers in plant science* 3, 1-11.

[学会発表](計 5 件)

1. Satake, A. Transportation of sucrose and flowering signal in a phloem network. EMBO Conference “Interdisciplinary plant development”. Cambridge, UK. September 22, 2014.
2. Satake, A. Exploring the mechanism of synchronized flowering by integrating molecular and modelling approaches. Joint Annual Meeting of the Japanese Society for Mathematical Biology and the Society for Mathematical Biology. Osaka conference center. July 31, 2014.
3. Satake, A. Nitrogen as a key regulator of mast flowering. 51st Annual Meeting of the Association for Tropical Biology and Conservation. Cairns, Australia. July 20, 2014.
4. Satake, A. Forecasting plant phenology by gene expression assessment. International Symposium “Cologne excellent Women in Science”. Cologne, Germany. July 18, 2013.

5. Satake, A. Mechanism of synchronized flowering: roles of nutrient dynamics and transportation. 10th International congress on plant molecular biology. Jeju, Korea. October 25, 2012.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐竹 暁子 (SATAKE, Akiko)
北海道大学・地球環境科学研究所・准教授
研究者番号：70506237