

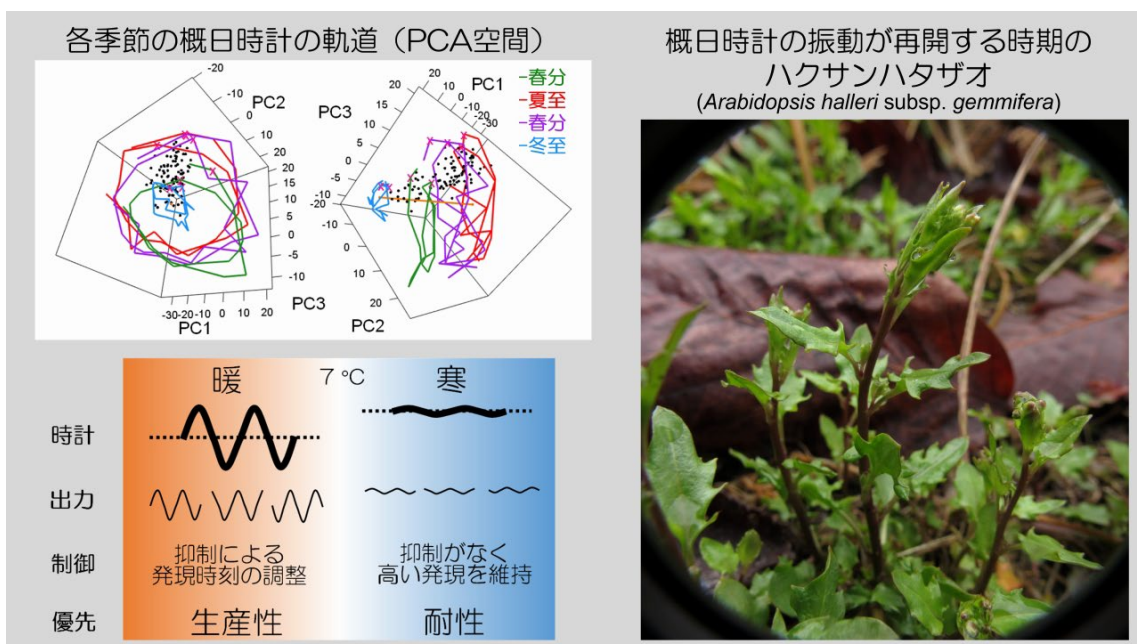
植物の時計が停止する温度では成長も停止することを野外データから発見

概要

京大大学生態学研究センターの工藤洋 教授と村中智明 特定研究員（現在は名古屋大学大学院生命農学研究科 助教）、湯本原樹 研究員（現在は信州大学山岳科学研究拠点 特任助教）、本庄三恵 准教授らの研究グループは、永野惇 教授（名古屋大学 生物機能開発利用研究センター）、Ji Zhou 教授（National Institute of Agricultural Botany, UK）との共同研究において、アブラナ科多年草のハクサンハタザオを対象とした野外トランスクリプトームと個体モニタリングにより、遺伝子発現の日周リズムが7°C以下で停止すること、その温度帯では成長も停止することを発見しました。

植物には概日時計という1日周期のリズム（日周リズム）を生み出すメカニズムがあり、様々な生理現象を昼夜サイクルに同調させて制御しています。工藤洋教授は兵庫県多可町のハクサンハタザオ自然集団の長期モニタリングを継続してきましたが、これまでの研究で気温が低下する冬季には、多くの遺伝子で日周リズムが停止し、発現が高止まりすることを報告していました。一方で、リズムが停止する閾値温度は不明でした。今回、野外トランスクリプトームの1時点データから概日時計の振動振幅を推定する方法を開発しました。その結果、日平均気温が約7°C低下すると、振幅が大きく減少することを見出しました。興味深いことに、個体サイズのモニタリングにおいて、同じく7°C以下では成長が停止することが示唆されました。概日時計の下流には低温耐性の遺伝子が含まれることから、冬季のリズム停止は、成長よりも低温耐性を優先するスイッチとして機能すると考察しました。また、今回の解析では、一部の遺伝子では冬季でも日周リズムが維持されることも明らかとなり、機械学習によるトランスクリプトームからのサンプリング時刻の推定は冬季でも可能であったことから、低温下においても時間情報は保持されていることも示唆されました。

本研究成果は2025年8月7日に日本植物生理学会の国際学術誌「*Plant and Cell Physiology*」にオンライン掲載されました。



1. 背景

野外で生育する植物は、環境変化に直接さらされており、季節的な温度変化に対しても様々な応答を示します。気候変動の植物への影響を考える上で、温度応答の詳細を理解することは必要不可欠です。しかし、植物の温度反応は基本的に非線形であり、反応全体を捉えるには大規模な実験が必要となります。一方で、年間を通じて自然個体群をモニタリングすることで、自然生息地で発生するあらゆる反応を観察することができます。本研究では、常緑多年草を対象に、年間を通じてトランスクリプトームと個体サイズを記録しました。トランスクリプトームにおいては冬季の低温で振幅が減少することが明らかとなっていた日周リズムに着目し、新規の解析手法を開発し、季節変化を詳細に明らかとしました。さらに、個体サイズの変化から成長速度の季節変化を求めました。その結果、日周リズムと成長の停止温度がどちらも7°C付近であることを見出しました。

2. 研究手法・成果

アブラナ科のハクサンハタザオ (*Arabidopsis halleri* subsp. *gemmifera*) を対象に、実施した野外トランスクリプトームを用いました。春分・夏至・秋分・冬至に行った日周サンプリングの結果をもとに、少なくとも3季節でリズムを示すコア日周リズム遺伝子 (core diel rhythmic genes) を204個同定しました。この204遺伝子を用いて主成分分析 (PCA) をしたところ、各季節の日周データは3次元空間上に並ぶ4つの円軌道として表示され、円錐形を形作りました。夏至の円軌道が大きく、冬至の円軌道が小さいことから、円軌道の半径が振幅に対応すると考えました。1週間ごとにサンプリングされた季節データについて、204遺伝子の発現量からPCA空間上の位置を計算しプロットしました。この点から円錐の中心軸への距離が、その日の円軌道の半径になり、204遺伝子から計算される統合振幅にあります。この統合振幅は、季節変化を示し、日平均気温と明瞭な関係がみられました。シグモイド関数のフィッティングにより、6.8°Cを境にリズムが停止することが示唆されました。

GO解析の結果、コア日周リズム遺伝子には低温耐性遺伝子が多く含まれており、リズムの低振幅化に伴い、高発現が維持されていました。低温耐性の向上は成長とトレードオフ関係にあるため、30個体の写真を1週間ごとに撮影し、成長量の季節変化を記録しました。その結果、リズムが停止する7°Cを境に成長も停止することが示唆されました。

コア日周リズム遺伝子には、春分・夏至・秋分・冬至のすべてでリズムを示す遺伝子が29遺伝子含まれており、冬季においても少数の遺伝子によって時間情報が保持されている可能性を、機械学習によるサンプリング時刻推定により検証しました。春分・夏至・秋分・冬至のコア日周リズム遺伝子の発現量と時刻の関係を4層ニューラルネットで学習し、毎週12時にサンプリングした季節データのサンプリング時刻を正しく推定できるかを検証しました。その結果、1年を通じて、1時間程度の誤差でサンプリング時刻を推定できることが明らかとなりました。日周サンプリングは2時間おきなので、高精度に時刻情報が推定できたこととなります。この結果から、冬季においても時間情報が保持されていることが示唆されました。

3. 波及効果、今後の予定

今回開発した手法により、日周サンプリングの情報を用いて、1時点のトランスクリプトームから、概日時計の振幅や時刻情報を抽出できることが示されました。気候変動が植物に与える影響を知るために、トランスクリプトームによるモニタリングが多く実施されることが考えられますが、本研究が示した日周サンプリングの重要性と、その利用例は、モニタリング計画を考える上で重要な指針にな

ると考えています。

低温でのリズム停止について、現象レベルでは様々なことが明らかとなりましたが、その分子機構は不明な点が多いです。ハクサンハタザオに近縁で、分子生物学ツールが充実しているシロイヌナズナに対し、今回得られた知見を適用することで、リズム停止の分子機構の解析も進めたいと考えています。

4. 研究プロジェクトについて

この研究は、日本学術振興会（JP21H04977、JP20J00255、JP19J22000、23K14253、24H02304、24H02116）、科学技術振興機構 CREST（JPMJCR1501）の支援を受けて行われました。研究機関は、京都大学生態学研究センターです。

<用語解説>

概日時計：複数の遺伝子のフィードバックループにより、自律した約 24 時間周期のリズムを生み出す。このリズムは昼夜サイクルに同期する。

P C A：主成分分析（Principal Component Analysis）。多数の変数から、少数で全体のばらつきを最もよく表す主成分と呼ばれる変数を合成する多変量解析の一手法。

<研究者のコメント>

「概日時計の研究者はリズムが好きなので、冬季にリズムが消える現象の解析は新鮮かつ困難も多かったです。どうにか低温でもリズムを刻む植物を作って、何が起きるかを知りたいと思います。」（村中智明）

<論文タイトルと著者>

タイトル：Coincidence of the Threshold Temperature of Seasonal Switching for Diel Transcriptomic Oscillations and Growth.

著者：Tomoaki Muranaka, Genki Yumoto, Mie N Honjo, Atsushi J Nagano, Ji Zhou, Hiroshi Kudoh

掲載誌：*Plant and Cell Physiology*

DOI: 10.1093/pcp/pcaf092