



植物工場にて、手にしているのは同工場から出荷される2種のレタス。地元メディアでしばしば取り上げられる人気商品だ。円内は同工場内の育苗棚の様子。

植物が刻むリズムを植物工場に生かす

大阪府立大学中百舌鳥キャンパスの一面に位置する植物工場研究センターには、葉菜類を量産し、実用化に向けた技術を検証する工場がある。ここで植物の概日時計の研究を進めているのが、同大学大学院工学研究科の福田弘和准教授だ。植物の概日時計への理解を深め、生体リズムを整えることで植物の成長をデザインすることをめざしている。

植物の寝起きのリズムが生育の鍵

薬味として用いられる大葉（青じそ）。その成長を何日も連続撮影し、数十秒に縮めた動画を見ると、大葉は鳥が羽ばたくように、広げた葉を持ち上げたり下ろしたりする（写真1）。「夜になると葉を垂らして眠り、朝になると起きて葉をピンと伸ばします。ただ、植物は私たちと比べてゆっくり動くので、人はその動きを認識できていないのです」と福田さんは解説する。「この植物工場で栽培している2品種のレタスも、大葉と同じように寝たり起きたりしています。レタスが寝ようとしている時

に照明を明るくすると、睡眠の妨害になります。概日時計が乱されると生育にも影響しますから、リズムを整える必要があるのです。従来の植物工場では蛍光灯やLED（発光ダイオード）光によって昼夜24時間の明暗周期が利用されてきた。福田さんはレタスの遺伝子発現リズムが22時間周期になっていることを発見し、この周期に合わせて明暗を調節して育てると水耕栽培のレタスの生育が早くなることを確認した。さらに、レタスの概日時計の周期そのものを光の波長分布によって調整できることも明らかにしている。大阪府立大学の植物工場ではこれらの成果を生かし、概日リズムと一致した明暗周期を与えることで、レタスを効率的に生産するための技術を開発している。

現在、この植物工場では毎日、5,000株のレタスが収穫され、府内のスーパーなどで販売されている。人工光利用型としては国内有数の大規模施設だ（写真2）。植物工場は、安全・安定な食料供給の実現につながることから期待が高まっているが、「成長予測」、「生産安定化」、「環境最適化」という3つの大きな課題があるという。福田さんは概日時計を切り口に知見を積み重ね、これらの課題を解決しようとしている。「どの苗がどのくらい大きくなるか、正確に予測することは至難の業です。同じような苗を同じ環境で育てても生育が違う。その要因はどこにあるのか、真面目な科学的探求が必要です」。

概日リズムから苗を診断・選別

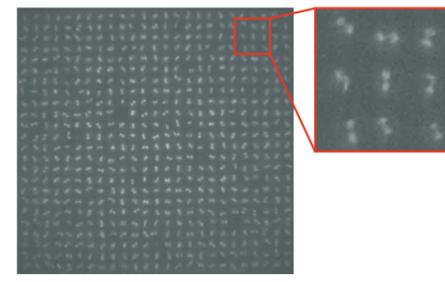
レタスは同じ日に種をまき、同じ環境で

育てても発芽後の生育にばらつきがある。このことが植物工場での歩留まりの低下や生産の不安定さの要因の1つとなっている。生育初期に大きく育ちそうな苗だけを定植するのが望ましいが、その後の生育がどうなるのかを予測することは困難だった。そこで福田さんが開発し、植物工場に導入したのが概日時計を利用した苗選別システムだ。

植物は、葉緑体に光が当たったとき、光合成に使われなかった光のエネルギーをクロロフィル蛍光に変えて外に出す。光合成が活発だとクロロフィル蛍光は少なく、光合成が活発ではないときは多くなるため、蛍光の強度から光合成活性を知ることができる。苗選別システムでは苗を高感度カメラで4時間おきに撮影し、測定した蛍光の強度の変化から個々の苗の概日リズムを把握している（図1）。概日時計の乱れが少ないほど、苗の生育は良い。

「苗の1本1本について、蓄積してきた過去のデータと結果を比べます。さまざまな生育指標と後の生育の関連を示すデータがあるので、大きく育つ苗かどうか判断できます。この苗選別システムでは、1日に7,200個体を分析し、リズムが乱れている2割を良い育ちが見込めない苗と判定し、残りの8割を自動で定植します」。選別後も、どの苗がどのように成長していくか個体ごとに追跡され、そのデータも保存・利用される。

「農業では『苗半作』といって、苗の出来が作物の出来を半分決めるという言葉があるほど、苗の質が重視されます。苗の生産は植物工場などの人工環境下で行われることが多くなっているため、苗選別システムは実際の農業現場にも役立つと考



600株のクロロフィル蛍光画像

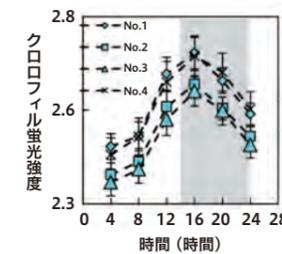


図1 左は種をまいてから6日目の苗。クロロフィル蛍光画像を600株ずつ、1日6回、4時間ごとに撮影し、右のグラフのようなクロロフィル発光強度の日内変化を捉える。グラフの縦軸は発光強度の比を表すための相対値。発光強度のリズムに乱れが見られる2割の苗は定植しない。

写真2



栽培室の様子。赤紫色のLEDの下で育つ。棚は18段あり、生育ステージに従って自動で移動されていく。左は収穫が近いレタス。

えています」。

概日時計の挙動を数理モデルで説明

植物の概日時計を研究する福田さんが、大学院では結合振動子系というシステムを研究していた。振動する素子がたくさん集まり、互いに影響しあう同期現象などを研究する非線形物理学の領域だ。学生時代に生物の挙動も数式で記述できることを知り、生物システムに興味を持ったという。「植物は環境のリズムに対して自分自身のリズムをどのように合わせていくのか、特に1つ1つの細胞がみな時計を持っていて、それが全体としてどのように同調しているのか、その数理的な部分は結合振動子系と同じように記述できるはず。現象を数式で理解できれば、将来の予測も人為的な制御も可能である点に、とても興味を持ちました」。

この考えに基づいた研究で、福田さんは植物の概日時計の環境適応能力が柔軟であることを、シロイヌナズナを用いて解き明かした。細胞集団の中でリズムが揃っているときは、外部からの光刺激に対して鈍感だが、リズムがバラバラなときは、外部からの光刺激に対して鋭敏になる。自然環境に即していうと、天候が安定しているときには概日リズムが揃って外部の光刺激にほとんど応答しないが、天候が極めて不順なときにはリズムがばらばらになり、弱い光刺激にも応答して概日時計を調整できるというように、環境に応じて柔軟に

適応できることがわかったのだ。

さらに、この同期状態の変化による応答の変化を数理モデルで明確に説明することにも成功した。植物工場での光の当て方をさまざまに変えた時の概日時計の挙動を詳細にシミュレーションできるようになり、植物工場の環境をよりきめ細かに設計できるようになるという。

農家を助ける技術で世界の農業に貢献

生命現象をよく表す数理モデルを作り、シミュレーションを行うためには、できる限り多くのデータを得る必要がある。そこで福田さんが力を入れている研究アプローチが「オミクス解析」だ。遺伝子・たんぱく質・代謝物などの生体分子を網羅的に解析し、生命現象を明らかにする手法である。

「例えば、光合成の活性は今どうなっているか、糖がどう輸送されているか、といった現象は、物理的議論の範囲に入ってきません。物理的議論だけでは肉付けができないのです。全ての遺伝子、場合によっては生体内の全ての化合物を網羅的に捉えてこそ、本当に役立つ技術になると考えています」。1本1本の苗の成長を調べる際に、概日リズムに関わる生体情報を網羅的に解析し、最適な栽培環境を設定することで、より高品質なレタスの生産につながる技術をめざしている。

福田さんは農家の出身で、農業の現状はよく知っている。「農業は人間の生活を支える崇高な産業ですが、現在は経済性との両立が難しくなっています。農家に役立つ技術を開発し、世界の農業に貢献したいと考えています」。

数理科学、農学、植物科学と分野の垣根を越えて研究を進める福田さん。新しい知識を得るため、異分野の研究者とも積極的に意見を交わす。その意欲的な姿勢は、作物生産を支える技術を生み出していこう。

写真1

寝ているときの大葉（左）と起きているときの大葉（右）。