

PRO

# PlantExplorer EDEN



PlantExplorer<sup>PRO</sup>  
EDEN

  
bronson

# カメラユニット

PlantExplorer PROは、光合成効率を画像化するための12.1メガピクセルの高解像度CMOSカメラを搭載しています。2本の独立した青色LEDストリングを使用することで、 $6000\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ の飽和測定パルスを生成できます。

## ソフトウェア

制御ソフトウェアは内蔵コンピュータにインストールされており、あらかじめ定義されたプロトコルを使用して様々な画像をキャプチャします。これらの定義済みプロトコルは、ユーザーインターフェースを使用してユーザーが変更できます。光源とフィルターの組み合わせにより、多様な画像が得られます。

制御ソフトウェアには、システムを遠隔操作する機能があります。この遠隔制御ソフトウェアを使用することで、システムを後から表現型解析システムに容易に統合できます。PlantExplorerの上部はベースから取り外せるため、自動化された植物表現型解析システムに組み込むことができます。

## フレーム/筐体の品質

PlantExplorer PROは、堅牢なアルミニウムフレームで構成されており、すべてのコンポーネント(光源、カメラ、コンピューター、フィルターホイールなど)がこのフレームに組み込まれているため、ユーザーはシステムを組み立てる必要がありません。

フレームは粉体塗装されたアルミニウム製で、すべての重要なコンポーネントは空気や埃のない環境に設置されています。システムはサーマルブリッジによって冷却されるため、埃や湿気が内部コンポーネントに損傷を与えることはありません。

## メンテナンス

システムは、筐体内部の清掃以外にほとんどメンテナンスを必要としません。メンテナンス契約を締結すれば、PhenoVationがシステムを年1回校正いたします。



# 光源

## 飽和パルス/測定光

PlantExplorerには2つの高輝度青色LEDアレイがあります。1つのアレイはPAM PSII測定の飽和光として使用され、もう1つのアレイはPAM PSII測定の測定光として使用されます。青色LEDの各アレイは、最大  $6000 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}^{-1}$ の光を生成できます。

## アクティニック光

PlantExplorer内には、アクチニックライトに使用できるさまざまなLEDがあります。以下のLEDが組み込まれています。

スペクトル	用途
415nm	アクチニックライト
660nm	アクチニックライト
3000K 白色	アクチニックライト
735nm	アクチニックライト/PSIIの緩和

すべてのスペクトルは5%~100%で制御でき、合計強度は  $750 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}^{-1}$ に達します。



# フィルターホイール&カメラ

## フィルターの組み込み

PlantExplorerのフィルターホイールには、12個のフィルター設置位置が用意されています。標準装備のフィルターは以下の通りです：

フィルター	用途
769nm	近赤外線イメージング
732nm	蛍光
710nm	レッドエッジ
640nm	赤色(老化)
550nm	緑色(老化)
540nm	アントシアニン
475nm	青色イメージング
1カスタム	
2カスタム	
3カスタム	
4カスタム	
5カスタム	

5つのカスタムポジションを顧客が選択できます。これらは、400nm～800nmの波長範囲にあります。より高い波長が必要な場合は、励起LEDも調整する必要がありますが、これは変更される可能性があります。

## 電動フォーカスシステム

カメラシステムはユーザーインターフェースを使ってピントを合わせることができます。

ユーザーインターフェースには「近距離」と「遠距離」のボタンがあります。これらのボタンを押すことでピント合わせ距離を変更でき、レンズから10cmから70cmまでの距離であれば、ほぼすべての被写体にピントを合わせることができます。また、このカメラの被写界深度は最大40cmと非常に深くなっています。



# カメラユニット仕様

トピック	仕様	備考
撮影サイズ	50cm×50cm×50cm	挿入可能な植物の最大サイズは80cmです
カメラの解像度	12.3 MP	
カメラセンサーの種類	C-mos グローバルシャッター	
カメラビット形式	12ビット	
カメラ接続	USB3.0	
内部コンピュータ	インテル ウルトラ 5	
RAM	32GB	
SSD	1024GB	
オペレーティングシステム	Windows 11 Pro	
接続	USB、HDMI、イーサネット	
画面	17インチタッチスクリーン	
制御	ワイヤレスキーボード、マウス	
光合成測定	OJIP と PAM	暗順応・明順応の両条件で測定可能
光合成パラメータ	Fv/Fm、Fi/Fm (OJIP) PAMクエンチング Phi <sub>PSII</sub> 、NPQ、qN、qP、	
カラーパラメータ	赤、緑、青、HSV、RGB(比率)、クラス	
マルチスペクトルパラメータ	クロロフィルインデックス、アントシアニン インデックス、NIR、レッドエッジ、スペクトル グリーン、遠赤	
形態学的パラメータ	最小円、最小長方形、凸包、スケルトン	
ソフトウェア	制御ソフトウェアPlantExplorer PRO EDEN、 無料の分析ソフトウェア	分析ソフトウェアのチュートリアル <a href="https://phenovation.com/tutorials/">https://phenovation.com/tutorials/</a>

# EDEN 仕様

トピック	仕様	備考
キャビネットの寸法	150cm×83cm×200cm	幅×奥行き×高さ
使用素材	ステンレス、鉄、アルミニウム	
総重量	450kg	キャビネット + カメラ
温度範囲	+10~+45℃	
湿度範囲	30%~90%	
CO <sub>2</sub> 範囲	400ppm ~ 2000ppm	
最大光強度	750μmol	
光のスペクトル	3000K、415nm、660nm、735nm	5%から100%まで個別に制御
解像度の設定値	5分	CSVファイル経由
内部コンピュータ	シーメンス PLC	
接続	USB	
画面	7インチのタッチスクリーン	
温度+湿度センサー	E+E HTP201	温度範囲:-40~+80℃ 相対湿度範囲:0~100%
CO <sub>2</sub> センサー	CO <sub>2</sub> プローブ GMP252	0~10000ppm
電気接続	1相 16アンペア タイプC、208~230ボルト	50+60Hz可能
ワット数	3600	最大ピーク

# PSII測定原理

## 1. クロロフィル蛍光

- a. ダイレクトCFイメージング
- b. PAM イメージング (パルス振幅変調)
- c. カウツキー OJIP 誘導曲線イメージング



a) ダイレクトクロロフィル蛍光イメージングは、種子や植物中のクロロフィル量を測定するために使用されます。青色LEDの強度とカメラの積分時間を組み合わせることで、ユーザーが調整して高品質の蛍光画像を取得できます。これらのクロロフィル蛍光画像は、種子の成熟度や植物の生理状態とクロロフィル量を関連付けるために使用されます。さらにこれら画像は、植物体と背景を自動識別(しきい値処理)するためにも使用されます。

b & c) 光合成のイメージングには、パルス振幅変調(PAM)法とカウツキー法という2つの基本的な測定原理が適用できます。これらの2つの測定原理は、互いに独立して選択できます。a) アンバーLEDを用いた短い測定光パルス中に、測定パルス中の画像をキャプチャすることで $F_0$ を決定します。最大蛍光収量 $F_m$ を捉えるために飽和パルスを印加します。このデータから、 $F_v/F_m$ などの様々な光合成パラメータを算出します。PAM法で $F_t$ を測定するためにアクチニクライトを照射し、飽和パルスと短い測定パルスを印加することで、光中の $F_m$ を測定します。これにより、例えば $\phi$ PSIIが得られます。

c) カウツキー法は、PAM法と並ぶもう一つの光合成イメージング手法です。暗適応した植物に光を当てた際に生じるクロロフィル蛍光の経時変化(OJIP誘導曲線)を連続撮影し、 $F_0 \cdot F_i \cdot F_m$ などの蛍光パラメータ画像を取得することで、さまざまな光合成パラメータを算出します。なお、各測定の前に背景画像を撮影し、誘導曲線の画像から差し引くことで、背景光の影響を除去します。

### Dark adapted(暗順応):

植物が暗適応状態にあるときに測定を行います。これにより $F_0$ と $F_m$ が得られます。このデータから、光化学系IIの最大効率と相関するパラメータである $F_v/F_m$ が計算され、画像として表示されます。測定されるパラメータ:PAM(パルス変調)測定では、暗適応した植物の $F_0$ と $F_m$ が画像化されます。Kautsky(カウツキー)測定では、誘導曲線が画像化されます。これにより、OJIP誘導曲線の $F_0$ 、 $F_i$ 、および $F_m$ の画像が得られます( $F_i$ は使用するフレームレートによって異なります)。

### Light adapted(明順応):

光化学系IIの有効効率( $\phi$ PSII)、ABS、およびETR画像と相関するパラメータを測定するために、光が当たっている状態の植物に対しても同じ測定手順が使用されます。アクチニクライトにより、照射される波長(スペクトル)と強度を制御することができます。

### Kinetic analysis(キネティック分析/動的解析):

動的キネティック分析では、植物はまず暗適応させられます。適応手順の後、植物は最初に暗闇で測定されます。その後、LEDによって連続的に照射されます。カメラは、植物が光の強度に適応していく過程(誘導分析)を測定します。その後、アクチニクライトが消灯され、時間の経過に伴う回復(リカバリー)が測定されます。 $F_0$ 、 $F_m$ 、 $F_m'$ 、 $F_t$ 、 $F_0'$ の画像が時間の経過とともに記録され、 $F_v/F_m$ 、 $F_v'/F_m'$ 、 $\phi$ PSII、NPQ、qN、qP、ETR が計算されます。

## ハイライト

- PAMおよびカウツキー原理によるクロロフィル蛍光イメージング
- 12Mpでの単一葉（マクロ） および植物全体のイメージング
- 提供: F0、Fm、Fv、Fo'、Fs'、Fm'、Fv'、Ft
- 動的なクロロフィル蛍光画像は、明順応プロトコルと暗順応プロトコルから提供されます。
- クロロフィル蛍光画像の高い信号対雑音比
- Foなどの測定に使用される青色450nm LED測定光源。
- パルス幅: 10 – 100  $\mu$ s/DC
- Fmの測定などに使用される青色450nm LED飽和光源。
- パルス幅: 10 – 100  $\mu$ s/DC
- Fo' などの測定用の730nm遠赤LED光源
- 植物とカメラの間の距離の測定範囲は10cm~70cmです。
- 有効撮像エリア 50x50 cm<sup>2</sup>
- 広帯域可視およびNIRコーティングを施した高品質Mpレンズ
- 目に見えるレンズの歪みはなく、補正は必要ありません



## データ取得プロトコル

$F_v/F_m = (F_m - F_0) / F_m$ : 光化学系II(PSII)光化学の最大量子収率と相関する画像。

$\Phi_{PSII} = F_q' / F_m' = (F_m' - F_s') / F_m'$ : 光化学系II(PSII)光化学の有効量子収率と相関する画像。

$NPQ = (F_m - F_m') / F_m'$ : 非光化学的消光(Non-PhotoChemical Quenching)と相関する画像。

ABS: クロロフィル吸収係数の画像。

ETR: 電子伝達速度と相関する画像。

Chfl 画像: 植物体を背景から切り分ける(しきい値処理する)ために、比較的長い露光時間で撮影されたクロロフィル蛍光画像。

光応答曲線(Light adaptation curves)

暗適応曲線(Dark adaptation curves)

PlantExplorer のコントローラーソフトウェアによって出力される、RAWデータ16ビット形式の画像:

F0: 暗適応状態における最小クロロフィル蛍光画像。

Fm: 暗適応状態における最大蛍光画像。

Fs': 明順応状態における定常状態の最小クロロフィル蛍光画像。

Ft': 明順応進行中における瞬間的なクロロフィル蛍光画像。

Fm': 明状態における定常状態の最大蛍光画像。

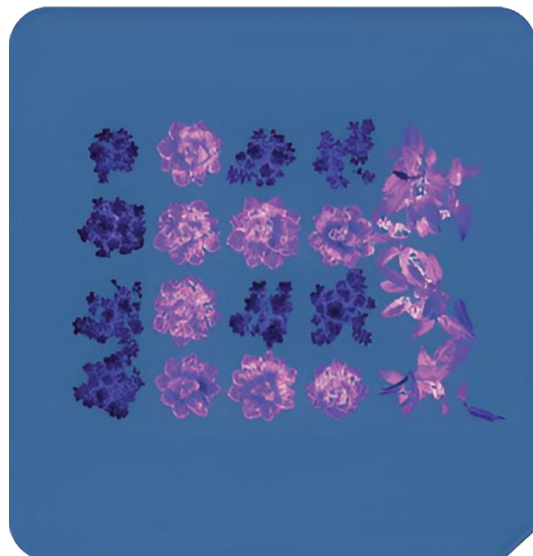
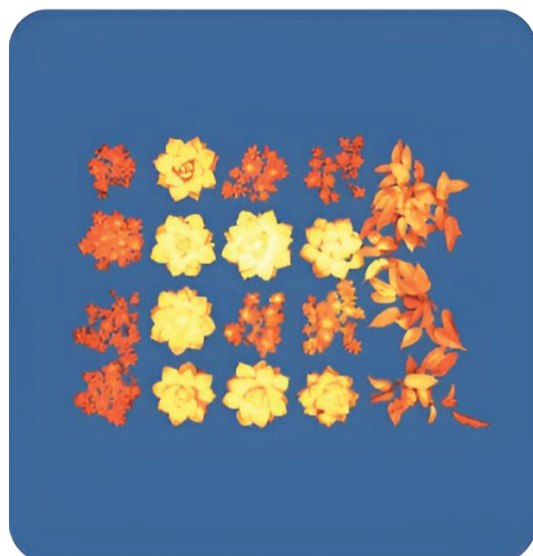
Fm'': 明順応進行中における最大蛍光画像。

F0': 遠赤色光(far-red)を照射した後の暗弛緩(ダークリラクゼーション)中における最小クロロフィル蛍光画像。

Fbackground: すべての蛍光画像に対する背景光。

RNIR: 近赤外(NIR)波長(760nm)での反射画像。

RRed: 赤色光(660nm)での反射画像。



# マルチスペクトル測定

次のスペクトル測定/計算は PlantExplorerを使用して行われます。

測定	計算
近赤外線イメージング	クロロフィル指数
レッドエッジイメージング	アントシアニン指数
グリーンイメージング	カラー画像
レッドイメージング	HSV
グリーンイメージング	NDVI
ブルーイメージング	RGB比



## 全画像でピクセル位置が一致

すべての画像は同一のカメラシステムで撮影されます。そのため、PSII測定とマルチスペクトル測定で得られたすべての画像はピクセル単位で完全に対応しており、画像間でピクセルレベルの直接比較が可能です。

# EDENユニット

EDENユニットは、PlantExplorer PROカメラで植物を測定しながら、あらゆる環境設定を完全に制御できる環境制御キャビネットです。温度、湿度、光量、CO<sub>2</sub>濃度を制御できるため、キャビネット内の植物にとって最適な環境条件、あるいは最適ではない環境条件を作り出すことができます。

## ソフトウェア

EDENはSL Experiment Controlソフトウェアで制御します。このソフトウェアを使用すると、すべてのパラメータに5分間隔の設定値を入力できます。また、カメラが必要とするすべての測定をスケジュール設定することも可能です。

## フレーム/建物の品質

EDEN Climateキャビネットは、外側シェルと内側シェルで構成されています。外側のシェルは粉体塗装されたスチール製で、キャビネットの内側は粉体塗装されたステンレススチール製です。

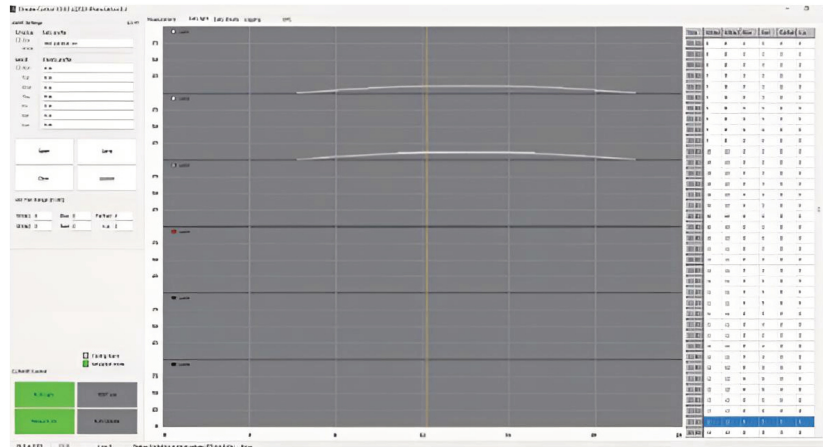
## メンテナンス

このシステムは、キャビネット内部の清掃を除いて、ほとんどメンテナンスを必要としません。

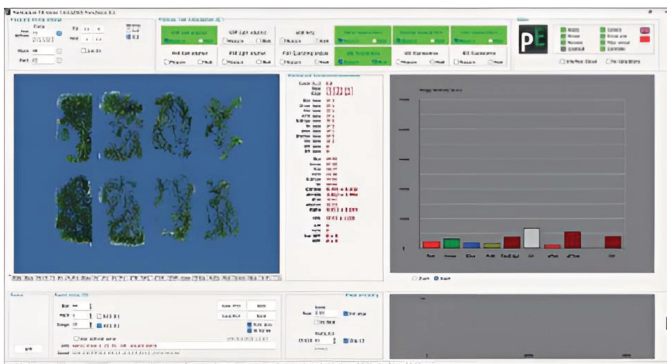


# SL 実験制御ソフトウェア

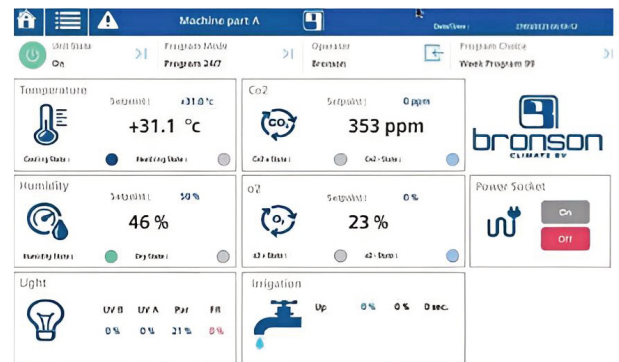
## SL実験制御ソフトウェア



## PlantExplorerカメラ制御



## EDEN環境制御



SL実験制御ソフトウェアを使用すると、カメラとEDEN環境制御キャビネットの両方を制御できます。CSVファイルをSLソフトウェアの環境制御タブにアップロードすると、環境制御キャビネットは24時間体制でプログラムを自動的に実行します。また、週ごとのプログラムも実行できるため、曜日ごとに異なる環境/照明プログラムを設定できます。

測定タブを使用すると、さまざまな測定プロトコルを選択して、1日を通して測定できます。



**PhenoVation**  
Life Sciences