平成27年度次世代施設園芸導入加速化支援事業（全国推進事業）に係る研修事業

大阪府立大学
植物工場研究センター
【栽培技術者育成支援研修2015】
研修資料

一般社団法人日本施設園芸協会

講　師：大阪府立大学　工学研究科准教授　福田弘和
研修名：植物工場の挑戦 －高品質な植物生産を目指して－

PFC

栽培技術者育成支援研修2015（農林水産省事業）
大阪府立大学　植物工場研究センター
2015年7月9日

植物工場の挑戦
−高品質な植物生産を目指して−

大阪府立大学　工学研究科
福田 弘和

講演内容

PFC

1. 植物工場の課題

①ハイテクとしての展望
②農作物と植物工場（社会課題→高品質・安心）
③植物工場産農作物の課題
④高度な栽培プロトコル　研究課題

2. 植物生理状態の高度な評価法

①トランスクリプトームとは
②トランスクリプトームデータの取得法

3. 研究開発の事例

①バイオマーカー遺伝子の探索
②大規模生物現象のキーストーン遺伝子（花成制御）
③フィールドトランスクリプトーム（イネの統計モデル）
④太陽光植物工場におけるトマトの概日時計診断

4. 大阪府立大学　植物工場研究センターの取組

①センター概要
②大規模遺伝子発現解析のプラットフォーム

PFC

1. 植物工場の課題

①ハイテクとしての展望

②農業と植物工場（社会課題→高品質・安心）

③植物工場産農作物の課題

・安定に生産できるか
・真に安全安心か
・伝統農業を継承できるか
・極限まで生産コストを低減できるか
＊植物生理状態の高度な評価が必須

④高度な栽培プロトコル　研究課題

・高度な栽培プロトコル
★朝採り（日制御）
★★旬の農作物（季節制御）
★★★匠の栽培プロファイル（理想条件）
★★★★環境パラメータ空間における黄金領域
（超高速最適条件探索）

①ハイテクとしての展望

PFC

The industrial model of fully-controlled plant factory for lettuce

ICT
ビッグデータ
ハイパースペクトルカメラ
メタボローム
トランスクリプトーム
オミクス診断
センサーネットワーク
3D解析
生体シミュレーター
仮想市場
自動搬送ロボットシステム
レーザー照明
気流解析
遺伝子組換え
薬用植物
・・・

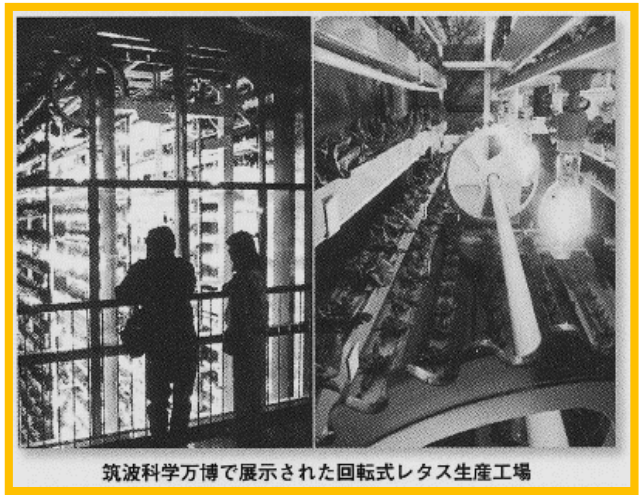
R&D Center for the Plant Factory
Osaka Prefecture University

Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries, JP
Ministry of Economy, Trade and Industry, JP
(2011)

Controlled parameters:
Light, Temperature, R.H., Nutrients(pH, EC), CO_2

植物工場： 30年かけ産業化へ

1985年　筑波科学万博


筑波科学万博で展示された回転式レタス生産工場

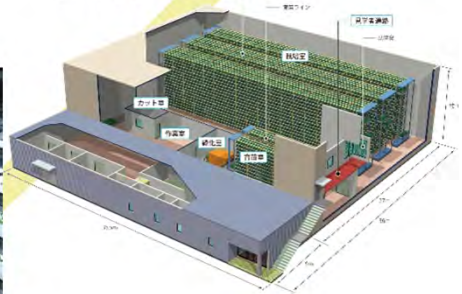
・社会的期待が大きい
・大きな課題

第6次産業！産業化へ
- 気候変動
- 国際情勢

- 東日本大震災2011
- 復興事業
- TPP 2013

第３次ブーム 2009~

大阪府立大2011

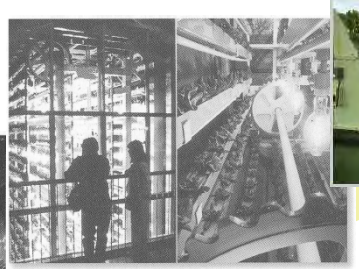


第２次ブーム 1990前~後

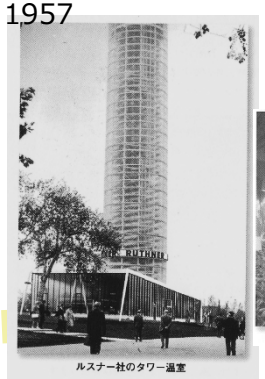
キューピーTS ファーム

第１次ブーム 1980中~後

筑波科学万博1985

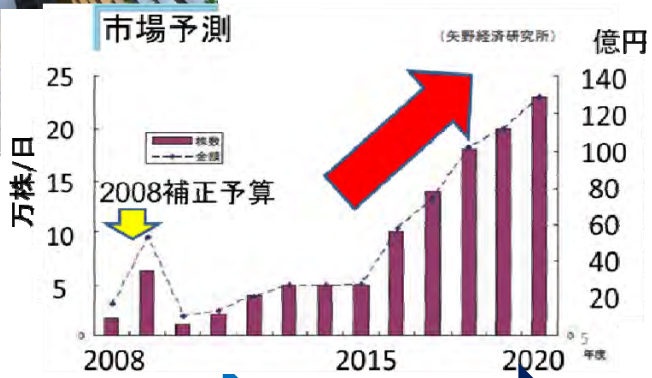

筑波科学万博で展示された回転式レタス生産工場

クリステンセン農場、デンマーク、1957


ルスナー社のタワー温室

米GE社、1970年前半

ファイトファーム社の植物工場



1次 → 2次 → 3次 → 産業化

1960　1970　1980　1990　2000　2010　2020

植物工場の将来ビジョン（成長産業へ）

産業への転換（2010）

＊ビッグデータの活用
＊ICT
＊自動化 / 機械化

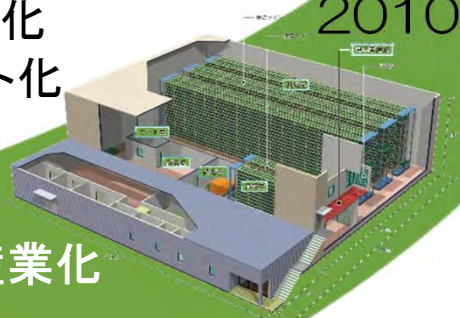
⇒ “経験則”の数値化

1985～

1990年代～
ブーム

2010年～

大規模化
低コスト化



2014年～

薬草植物工場

産業化

生命科学

数理情報科学

自動化ロボット技術

フィールド利用型

コージェネレーション
光触媒・水素エネルギー
CO_2利用（COI-T）

空調最適化技術

2020年～

超低コスト
超機能型
⇒成長産業へ

2030年～

⇒ ライフイノベーション
⇒ 作物生産イノベーション

研究拠点　大阪府立大学植物工場研究センター

PFC 植物工場研究センター
R&D Center for the Plant Factory

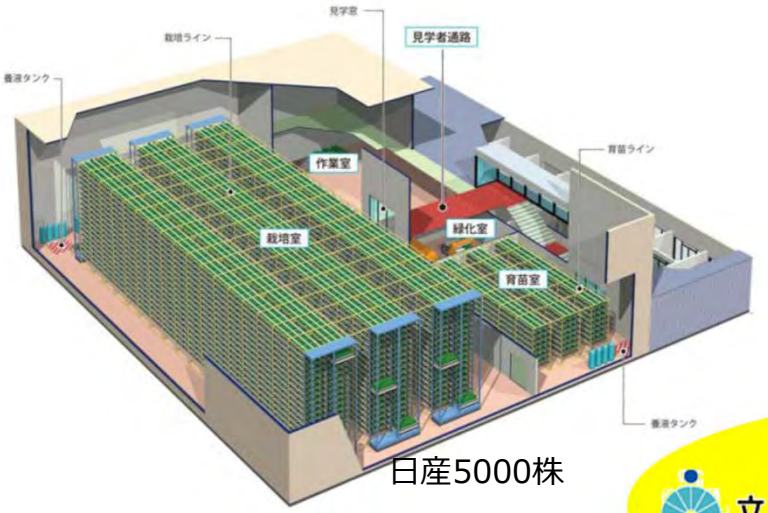
ビジネス

ベンチャー企業　2013設立

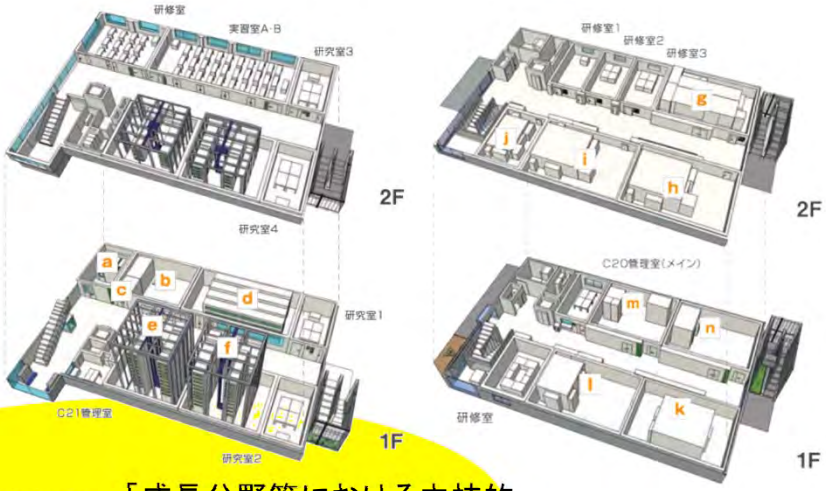
コンソーシアム企業（約90社）

日産250株

産業実装



日産5000株



実証

文部科学省　「成長分野等における中核的専門人材養成」事業(2014)

技術開発

基礎研究

産業実装棟（経産省）
2014 経済産業省

実証棟（農水省）
2011 農林水産省

R&D棟（経産省）
2011 経済産業省

植物工場研究センターのインパクト

「社会」への発信

報道数：129件
- テレビ（36）
- 新聞（70）
- その他（23）

見学者数： 19,926名
- 行政等 （1,677）
- 研究者・学生(6,799)
- 企業・一般他(11,450)

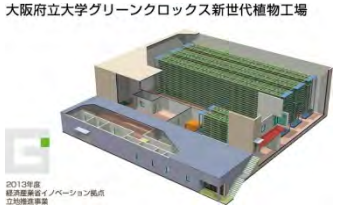
行政関係：
- 東日本（復興支援）
- 堺市（農業・産業振興）
- 大阪府（販売支援）

＊2009～現在

「産業基盤」の創生

コンソーシアム会員： 70社

高収益型・高度技術導入
標準モデルの構築

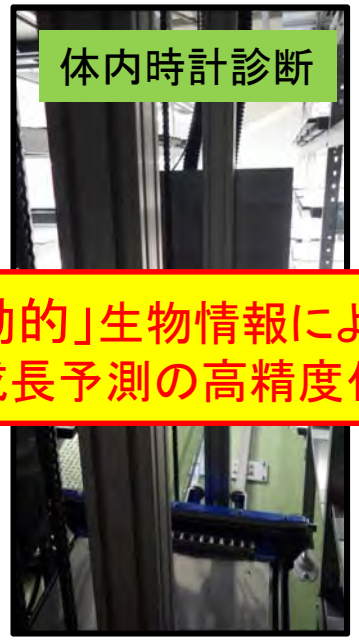


生産量：5000株／日
売上： 2億円
雇用： 40名（パートタイム含）
建設費：7億円

「専門人材」教育・雇用

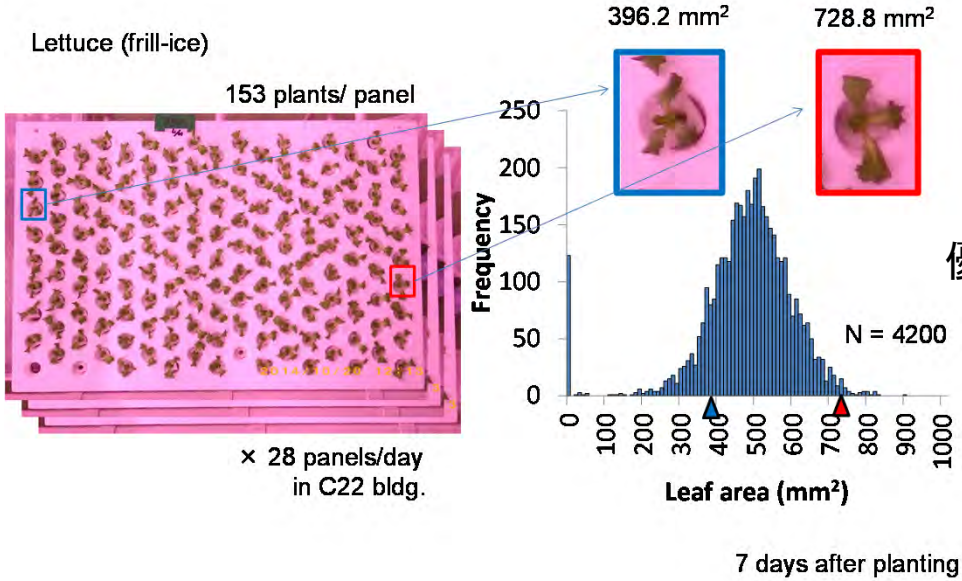
<u>研究開発拠点として国の人材育成事業の実施</u>
○文部科学省「成長分野等における中核的専門人材養成等の戦略的推進」
○農林水産省「次世代施設園芸導入加速化支援事業」

実用技術開発： 成長予測技術（優良苗選別技術）

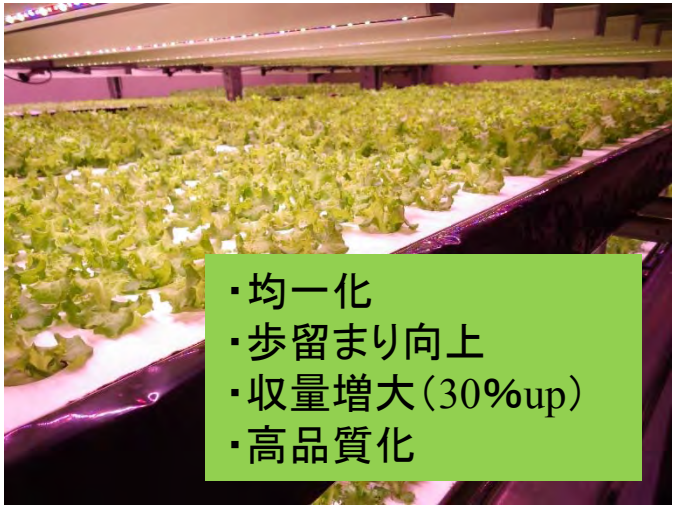


「動的」生物情報による
成長予測の高精度化

「苗半作」をテクノロジー化



優良苗選別



②農作物と植物工場

PFC

社会課題（根本課題）
●高齢化・後継者不足による伝統農業の危機　→　伝統農業の継承技術が必要
●従来農作物への需要　→　「匠の農作物」を生産できる植物工場システム

農家　研究機関　植物工場企業　消費者

伝統の継承

作成・提供

安定安心供給

匠の農作物

「匠の栽培プロファイル」

◎デジタル継承技術

〇匠の農作物
×異常気象リスク
×高齢化・後継者不足

〇新規ビジネスチャンス
〇安定安心供給
△農作物のクオリティ

〇安定安心供給
〇高品質（伝統農作物）
〇高機能
〇適正価格

③植物工場産農作物の課題

PFC

栽培プロトコルに関する課題

課　題	背景／要因	研究開発
✔安定した生産か	・ハードウエアの経時変化 ・栽培環境の不均一性 ・種子の変化 ・栽培者（栽培法）の変化	・生産システムの確立 ・種子の診断、選別 ・栽培プロトコルの確立
✔真に安全安心か	・従来農作物との比較なし ・評価が十分でない	・代謝物診断 ・遺伝子発現診断
✔伝統農業を継承できるか	・＜食材＞に対する直観 ・ブランド志向 ・栽培システムの違い ・栽培環境コピーが困難	・「匠の栽培プロファイル」
✔極限まで生産コストを低減できるか	・広大なパラメータ領域 ・厖大な探索時間	・「黄金領域」の探索 ・超高速最適パラメータ探索

＊植物生理状態の高度な評価が必須

④高度な栽培プロトコル　研究目標

PFC

当研究室の目標：匠の農作物を生産できる植物工場システムの開発

「高度な栽培プロトコル」構築のシナリオ

★朝採り（日制御）

体内時計

★★旬の農作物（季節制御）

体内時計、花成制御、フェノロジー

★★★匠の栽培プロファイル（理想条件）

体内時計、時系列トランスクリプトーム、統計モデル、フィールドサーバー

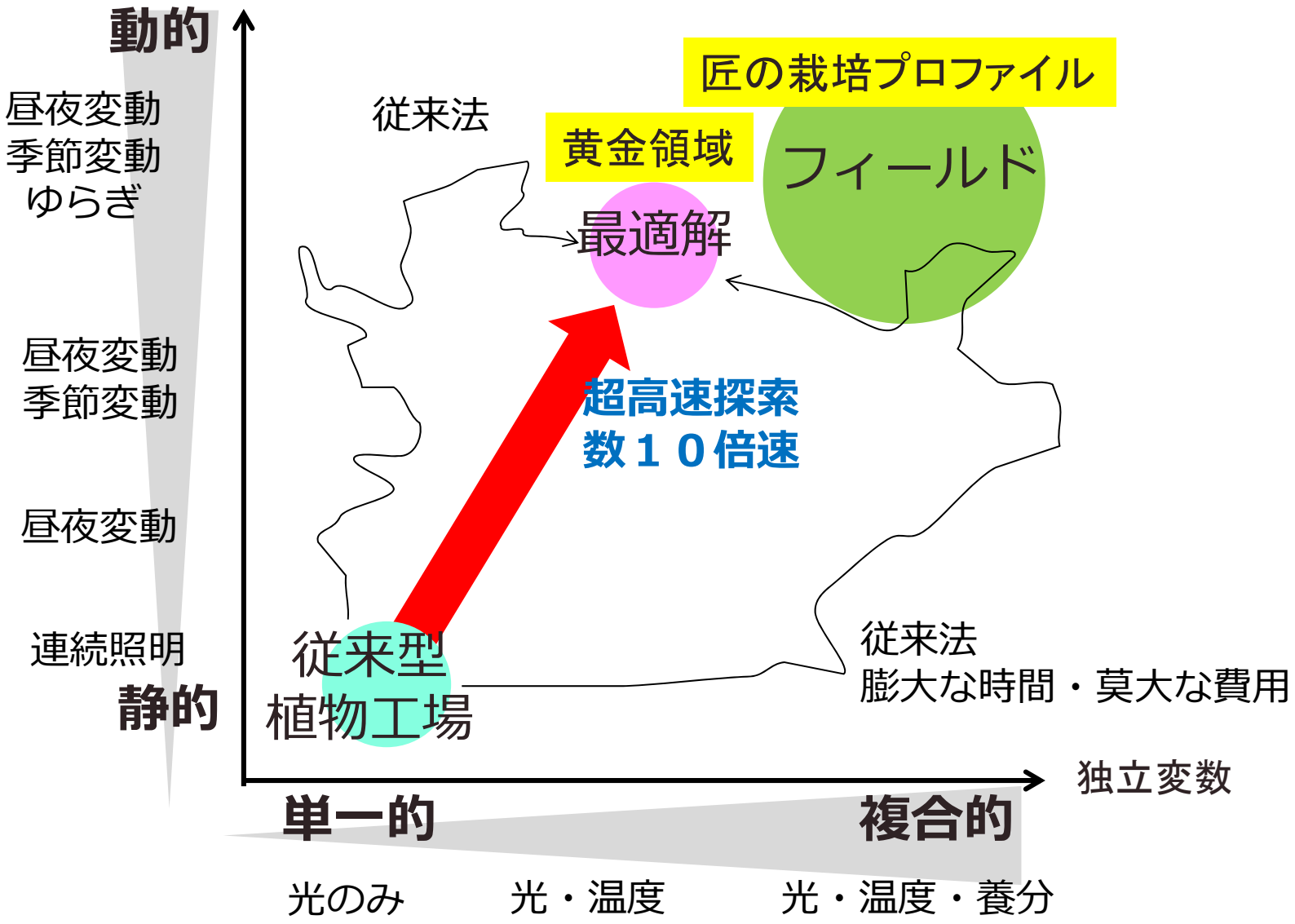
★★★★環境パラメータ空間における黄金領域（超高速最適化技術）

体内時計、時系列トランスクリプトーム、統計モデル、ODME、機械学習

超高速最適化技術

PFC

最適環境パラメータの超高速探索

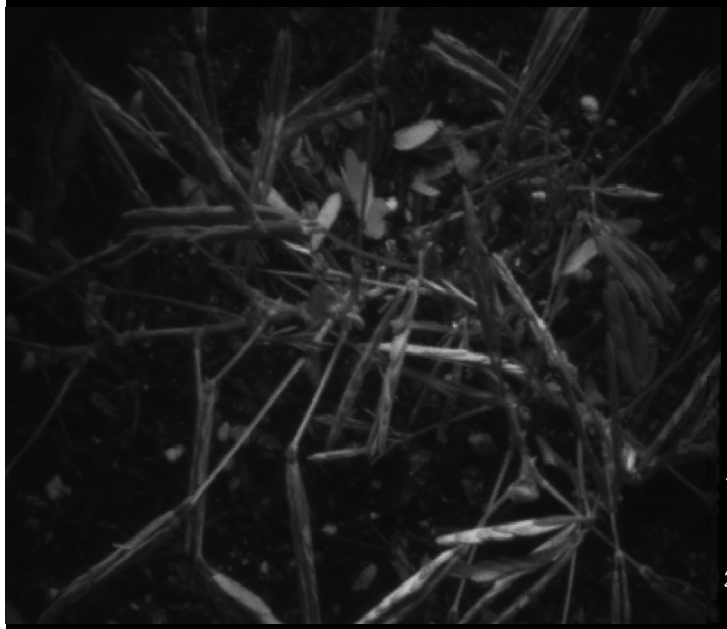


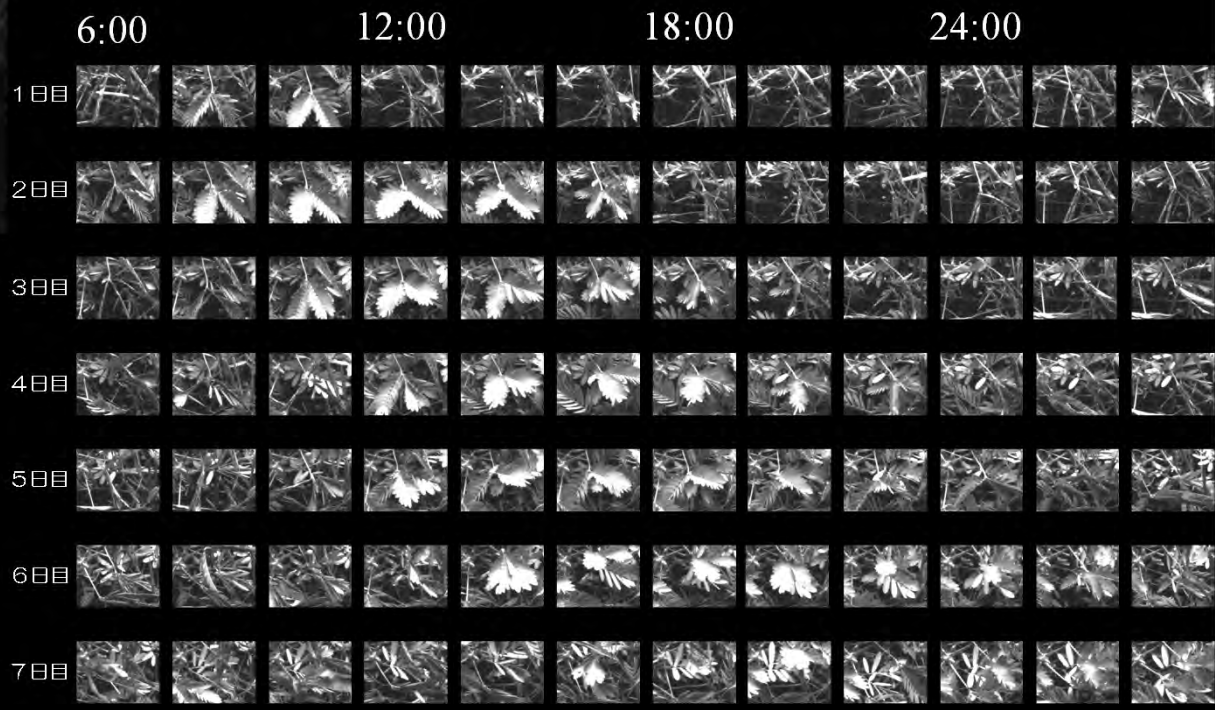
植物の就眠運動リズム

under LD cycles (16 h: 8 h)

Fukuda Lab.

Autonomous oscillation（τ ~ 25 h）





Mimosa pudica,
Under continuous dark

Materials and Methods

Cultivation system:

Hydroponic cultivation system with the artificial lights (FL, LEDs) in the R&D building (C20)

Cultivation conditions:

Raising seedling: 5 days
Cultivation: 15 or 30 days
Temp.: 22℃
R.H.: 50%
CO_2: 1000 ppm
Nutrient: Otsuka A solution (Otsuka Chemical Co. Ltd., Osaka, Japan)
(EC : 2.0mS/cm, pH : 6.0)
Pump: 10~15L/min

Light conditions:

Red LED (660 nm)
~200 µmol m^{-2} s^{-1}

Red LED (660 nm)
Blue LED (450 nm)
Red :Blue = 8:2
Totally ~230 µmol m^{-2} s^{-1}

Florescence light
~400 µmol m^{-2} s^{-1}

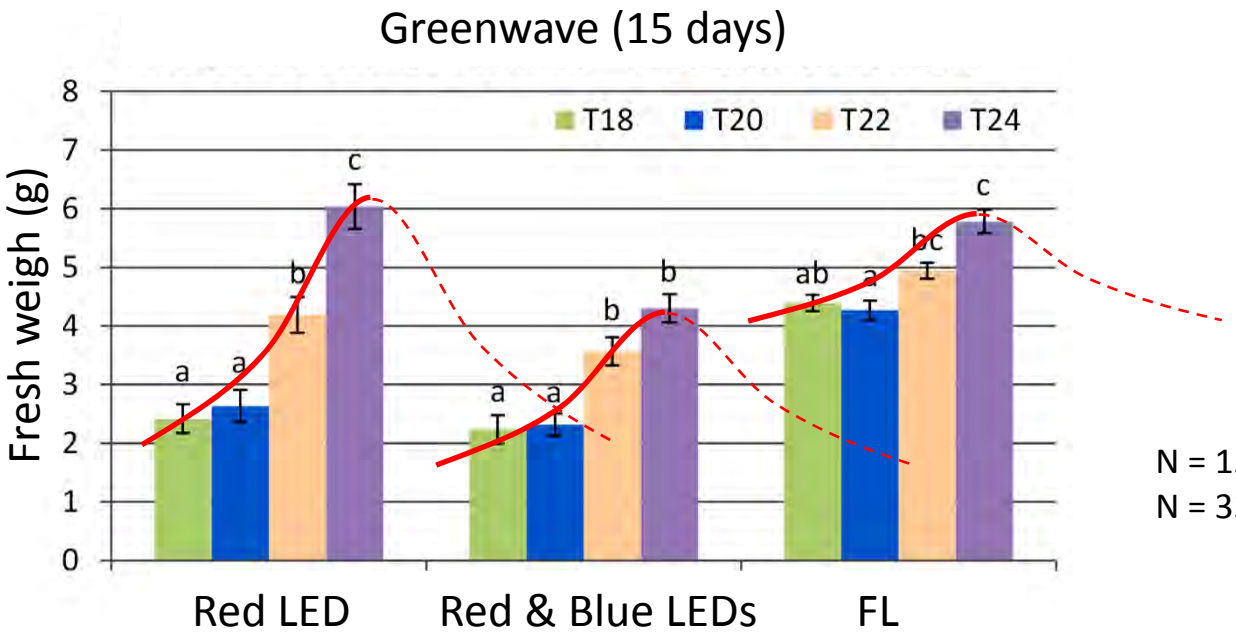
Plant materials:

1. Cos lettuce

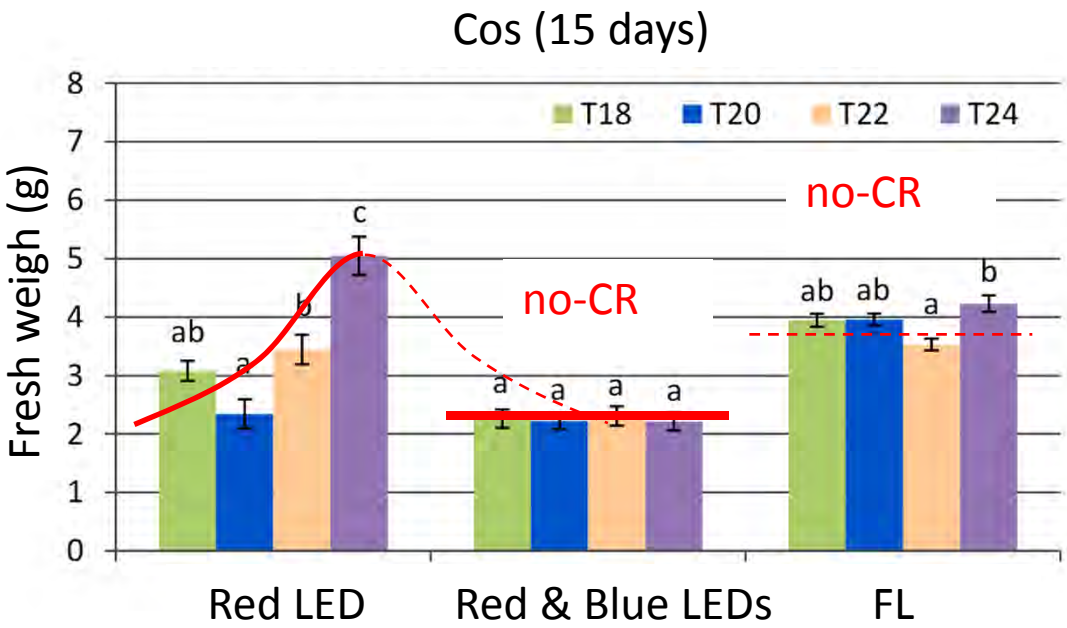
2. Greenwave lettuce

(*Lactuca sativa* L. cv. Cos and Greenwave; the fixed lines of lettuce cultivars from TAKII & Co., Ltd., Kyoto, Japan)

Results: CR in lettuces



N = 15～60（LED）
N = 33 ～ 168（FL）

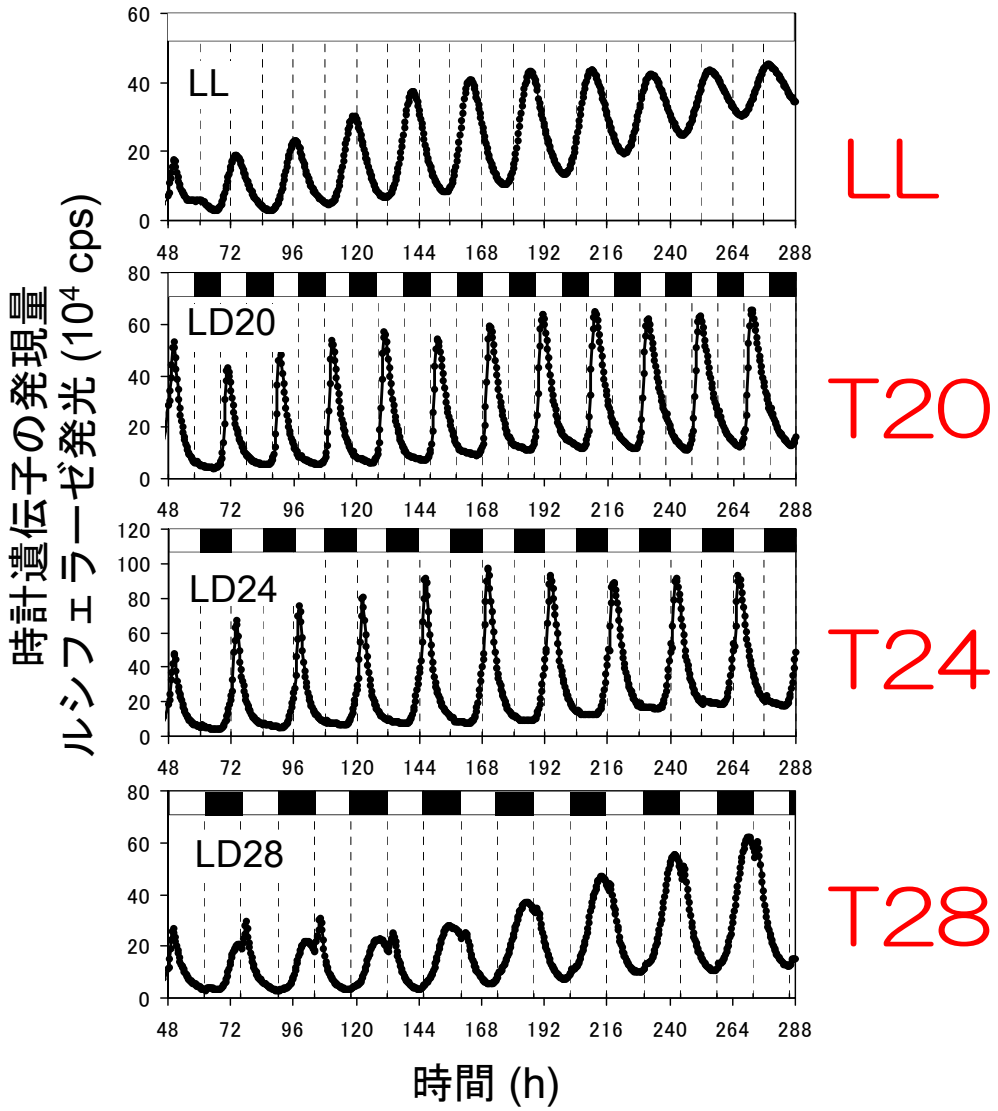


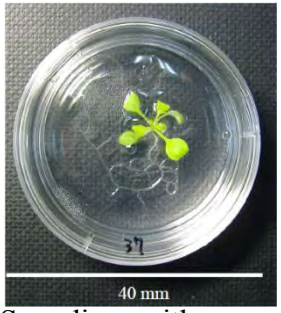
明暗サイクルへの引き込み

サーカディアン共鳴現象

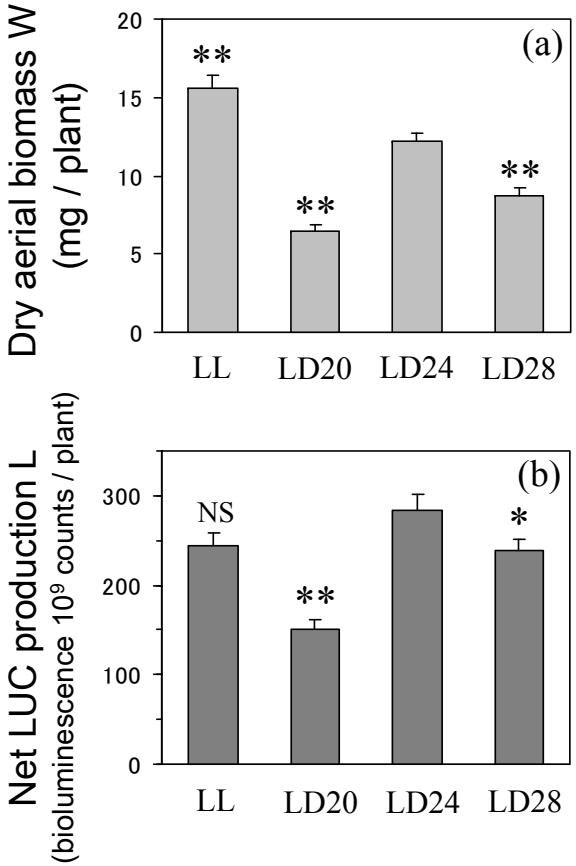
Dodd et al., Science 2005

赤色LED





MS medium with sucrose



シロイヌナズナ CCA1::LUC

H. Fukuda, et al., Environ. Control Biol. 2011

④高度な栽培プロトコル　研究目標

PFC

当研究室の目標：匠の農作物を生産できる植物工場システムの開発

高度な栽培プロトコル

★朝採り（日制御）

体内時計

★★旬の農作物（季節制御）

体内時計、花成制御、フェノロジー

★★★匠の栽培プロファイル（理想条件）

体内時計、時系列トランスクリプトーム、統計モデル、フィールドサーバー

★★★★環境パラメータ空間における黄金領域（超高速最適化技術）

体内時計、時系列トランスクリプトーム、統計モデル、ODME、機械学習

PFC

2. 植物生理状態の高度な評価

①トランスクリプトームとは

・生物情報の階層構造：オミクス
・バイオマーカー遺伝子
・解読された作物ゲノム
・シーケンシング能力の跳躍
・ゲノムに対するコスト

②トランスクリプトームデータの取得法

・サンプリング
・シーケンシング
・データ解析

バイオマーカー遺伝子

PFC

遺伝子発現を「〇〇〇」のバイオマーカーとして扱う

・ストレス応答

各種ストレス遺伝子（*HSP*、イネ乾燥・生育抑制*OsPIL1*、・・・）

・窒素施肥の効果

トウモロコシ、8個の遺伝子　Yang., et al., Plant Physiology (2011)

・開花タイミング

野外の開花期、2個の遺伝子　Satake et al. Nature Communications (2013)

・体内時計

1個の時計遺伝子の時系列
数十の時計表示遺伝子　Ueda, et al. PNAS (2004)

・生育、品質　：最適条件

不明・・・

②トランスクリプトームデータの取得法

PFC

愛媛大学植物工場研究センター

時系列トランスクリプトーム

多検体RNA-seq解析

葉切片を2日間に渡って
2時間毎10サンプル取得

光合成活性の高い
上層部の葉を対象

HiSeq

Agilent Bioanalyzer 2100

PFC

3. 研究開発の事例

①バイオマーカー遺伝子の探索

②大規模生物現象のキーストーン遺伝子（花成制御）

③フィールドトランスクリプトーム（イネの統計モデル）

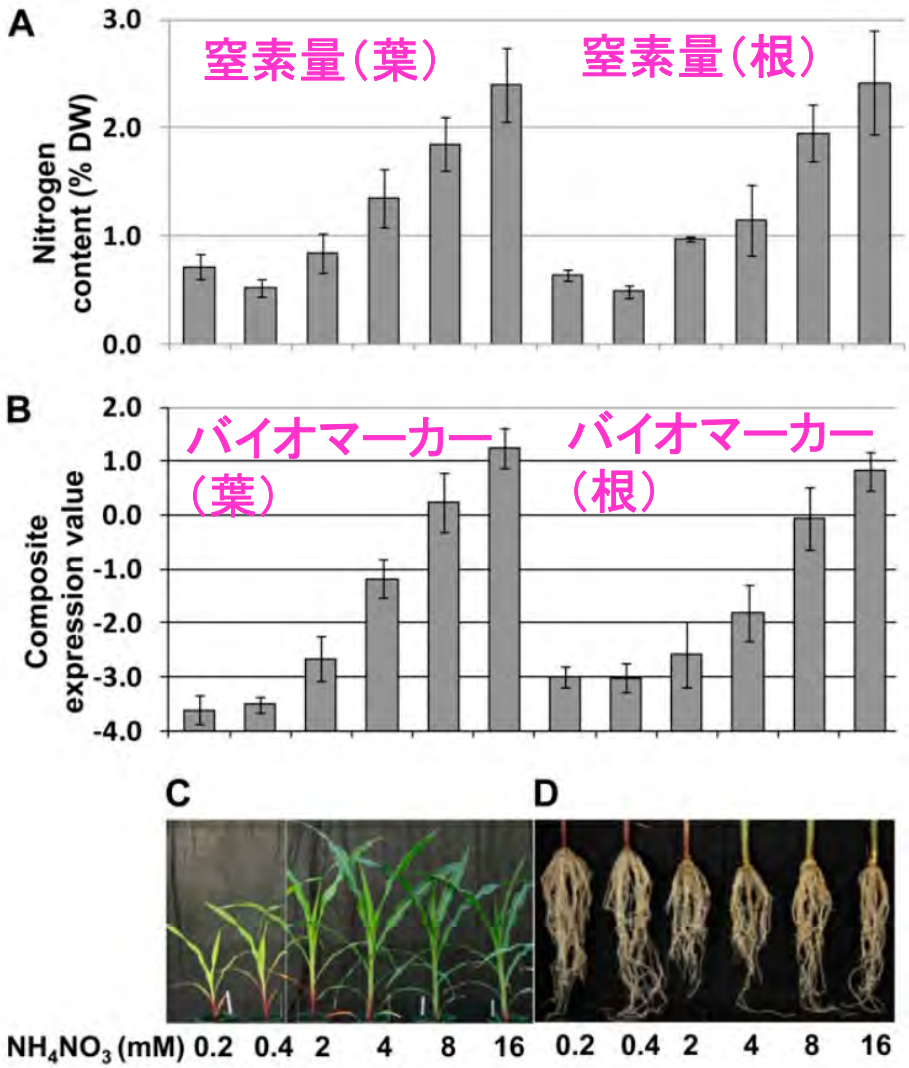
④太陽光植物工場におけるトマトの概日時計診断

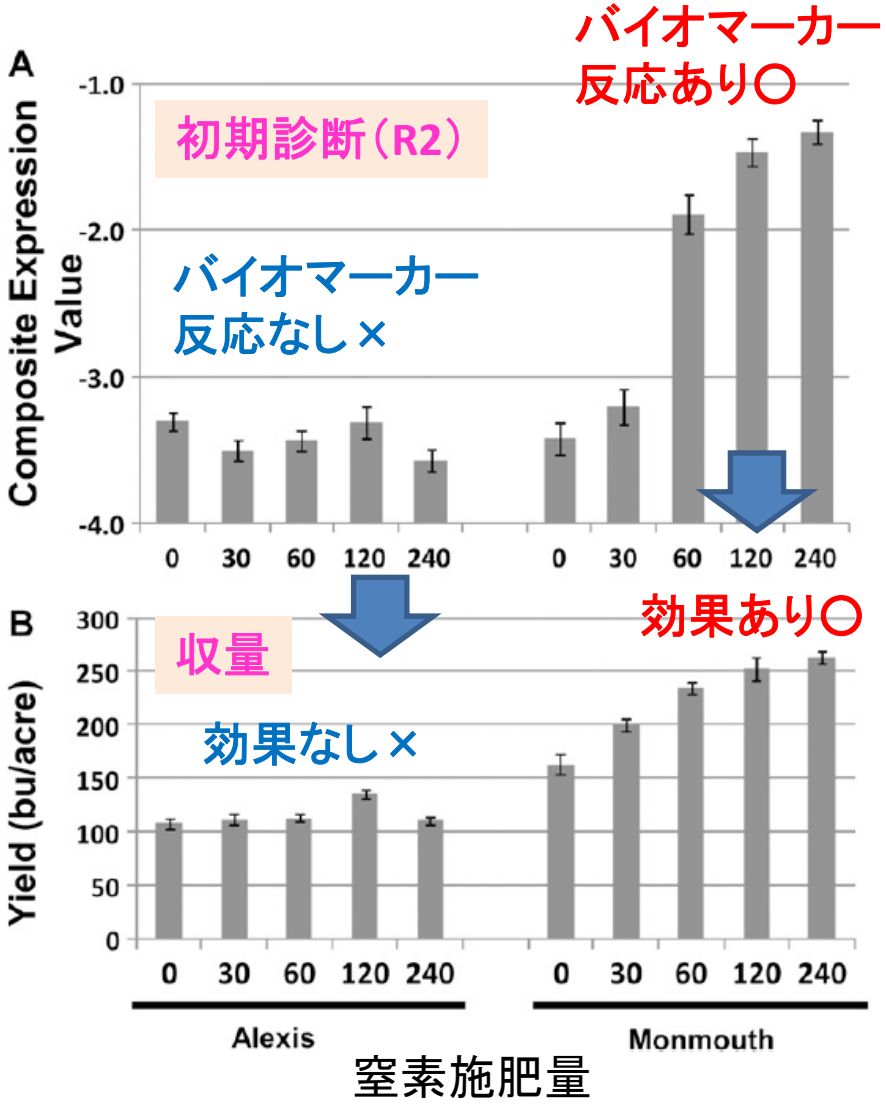
8／32000　①バイオマーカー遺伝子の探索

窒素濃度の遺伝子診断と収量予測

PFC

トウモロコシ：モンサント社の研究　Yang., et al., Plant Physiology (2011)





②大規模生物現象のキーストーン遺伝子（花成制御）

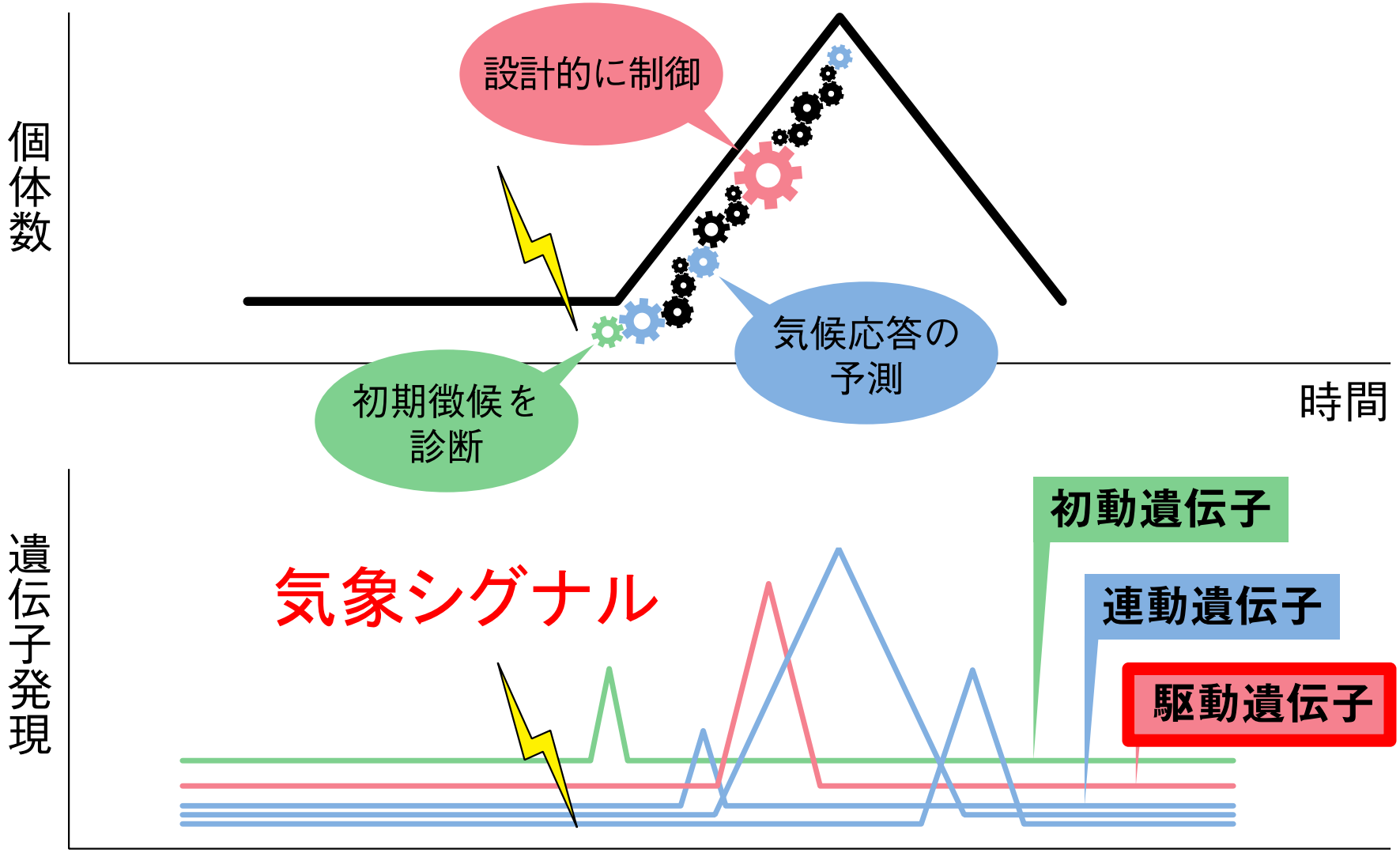
PFC

大規模生物現象の視点から
Large Scale Biological Events

愛媛大学植物工場研究センター

LSBE研究会HPより

時系列トランスクリプトームからキーストーン遺伝子群を同定



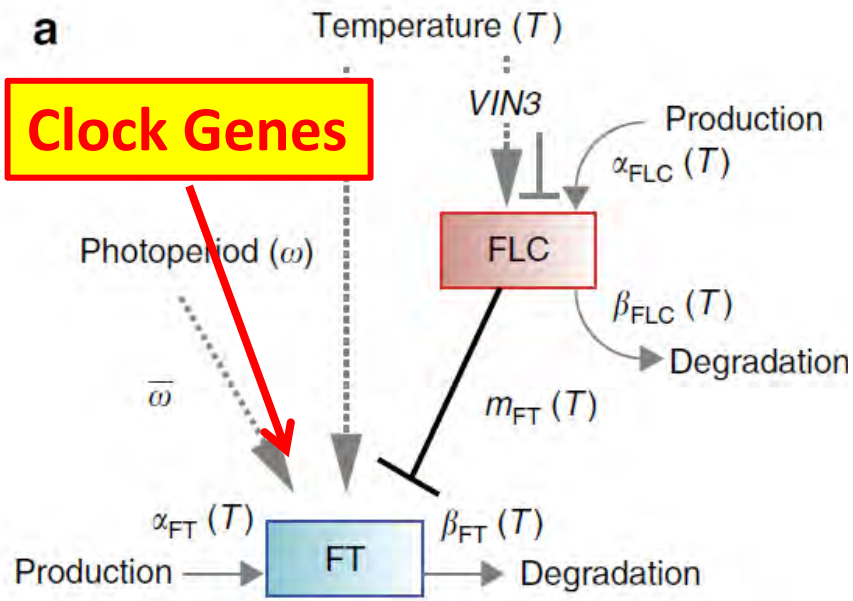
LSBE研究会HPより

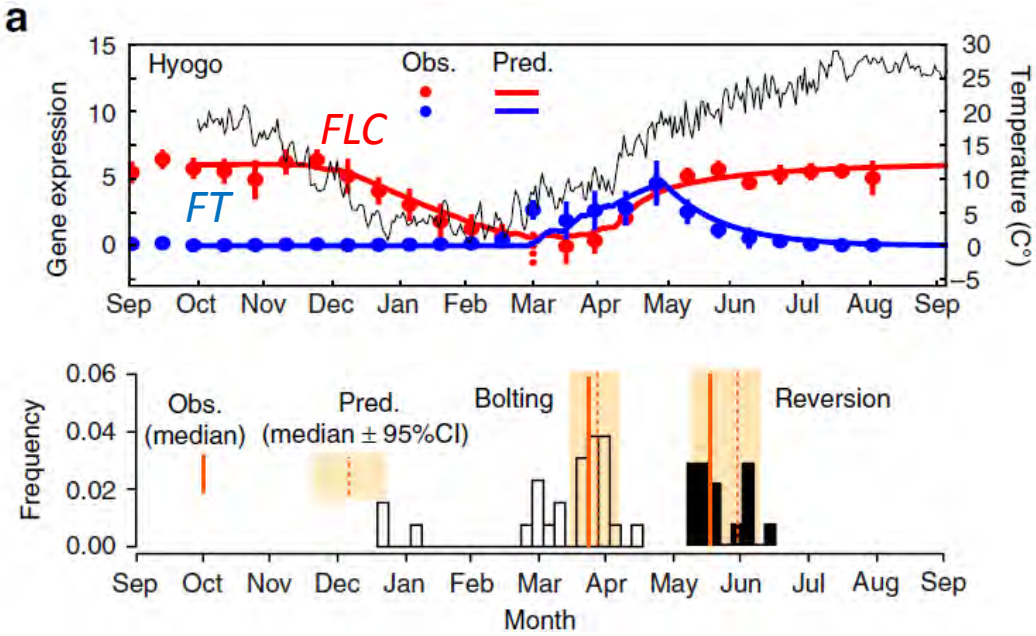
駆動遺伝子（*FT*、*FLC*）の発現予測による開花予測

PFC

$$\frac{dx_{FLC}}{dt} = \alpha_{FLC}(T)f(x_{FLC}) - \beta_{FLC}(T)x_{FLC},$$

$$\frac{dx_{FT}}{dt} = \alpha_{FT}(T)g(x_{FLC})h(\omega) - \beta_{FT}(T)x_{FT}.$$





ハクサンハタザオの開花制御モデル

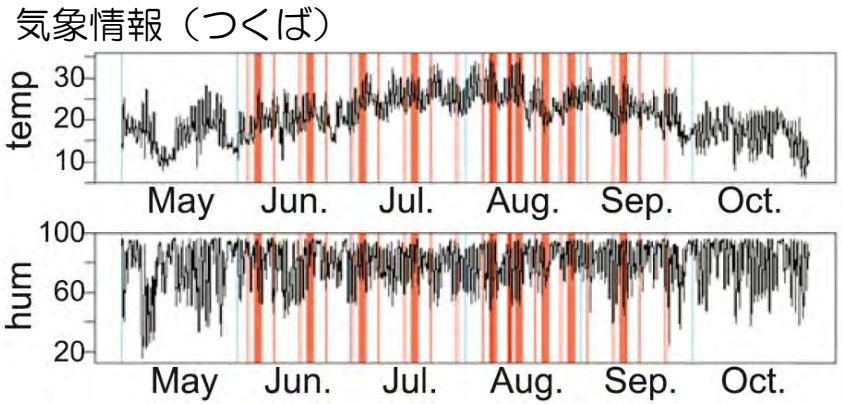
Satake, et al., Nature Commu. 2013

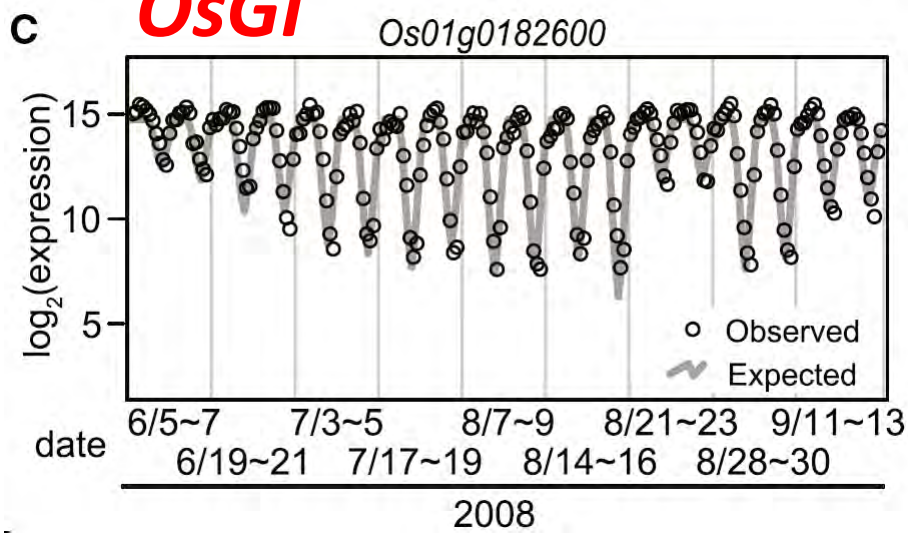
③フィールドトランスクリプトーム（イネの統計モデル）

イネ・時系列トランスクリプトームの研究（Nagano et al., Cell 2012）

遺伝子発現量 ＝

成長ステージ *(D)* ＋ 日周期変動 *(C)* ＋ 環境応答 *(E)* ＋ α





A

$\log_2$(exp. of *Os01g0182600*)

$= Norm(\mu, \sigma)$

$\mu = \alpha + \beta_3 E + \gamma_1 N8$

α = 12.8 pl = 371 min

β_3 = -8.47 th = 14.8 °C

γ_1 = 0.55 os = 21.2

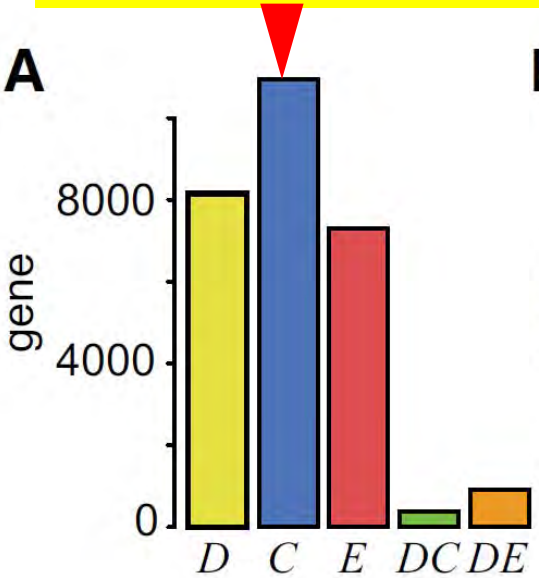
σ = 0.51 ol = 7.73 hr

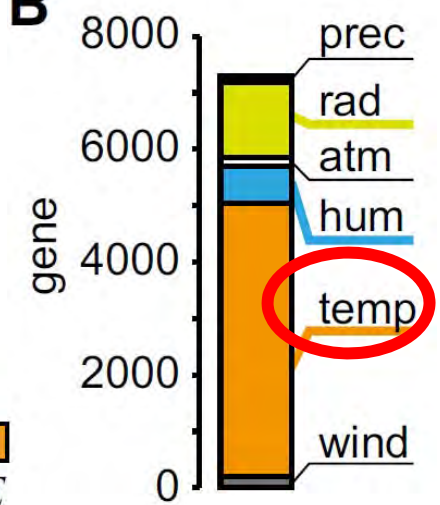
w : temperature

f : dd-response model response over th

g : rect. gate model

葉で発現が認められる
遺伝子の4割がC
を最大成分にもつ





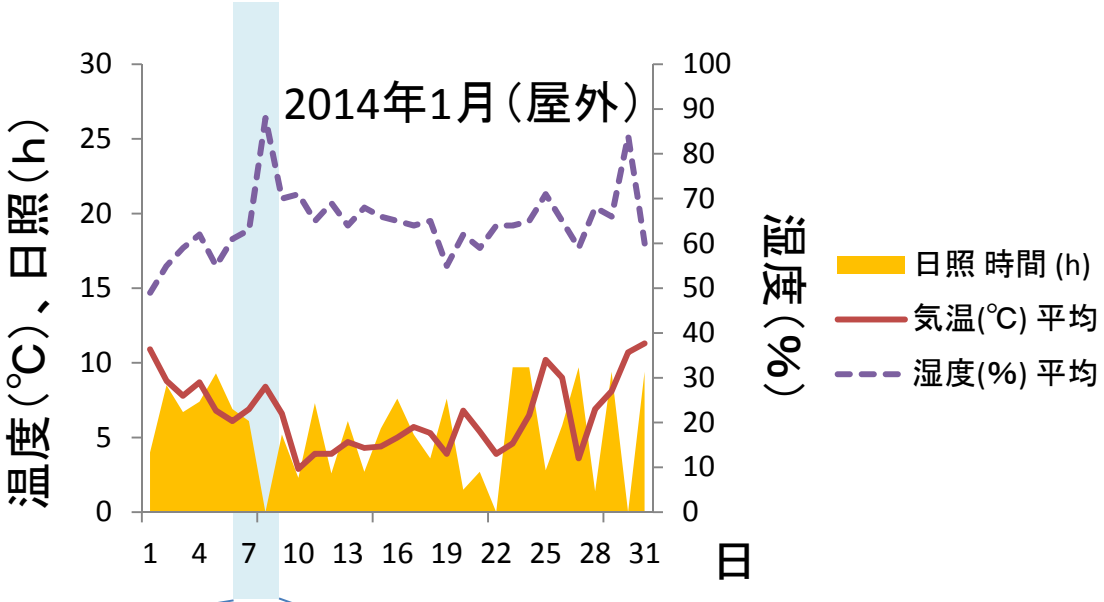
④太陽光植物工場におけるトマトの概日時計診断

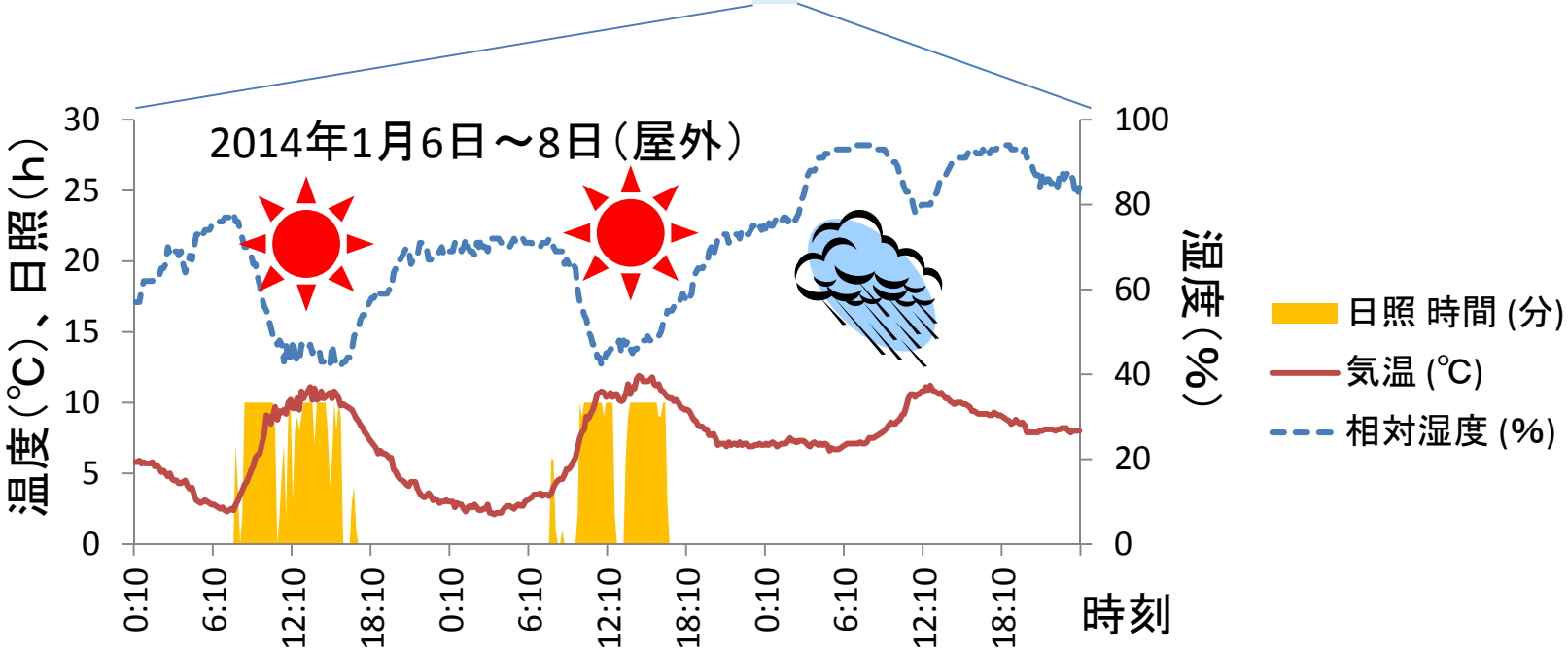
PFC

不規則・複雑に変動する環境条件

PFC

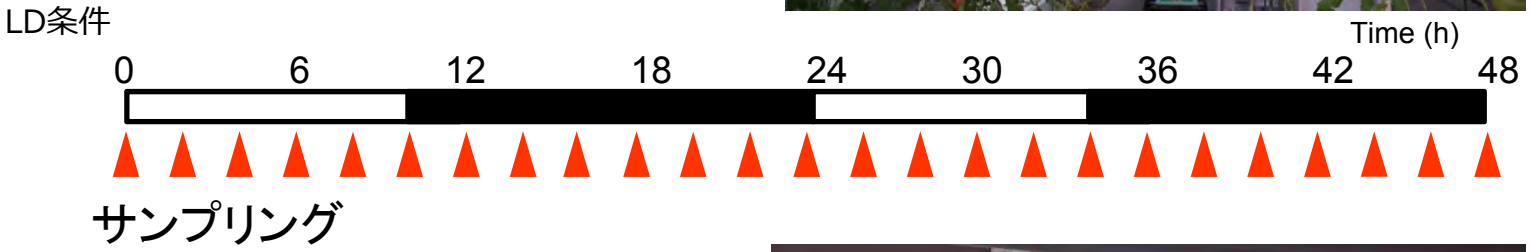
愛媛県・松山市・愛媛大学





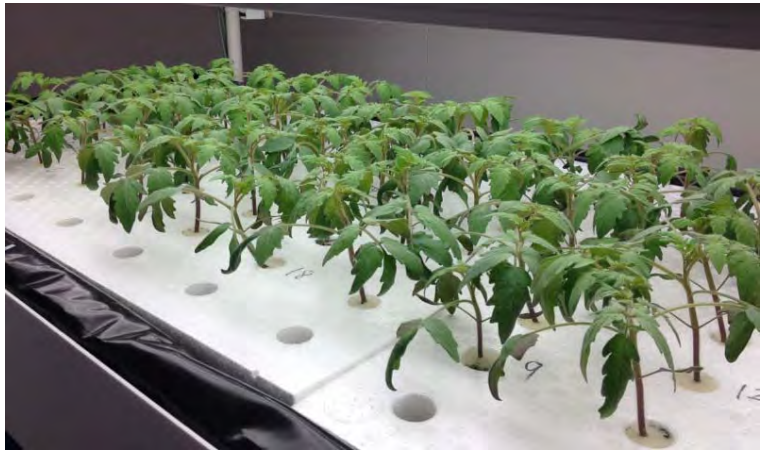
「対象データ」

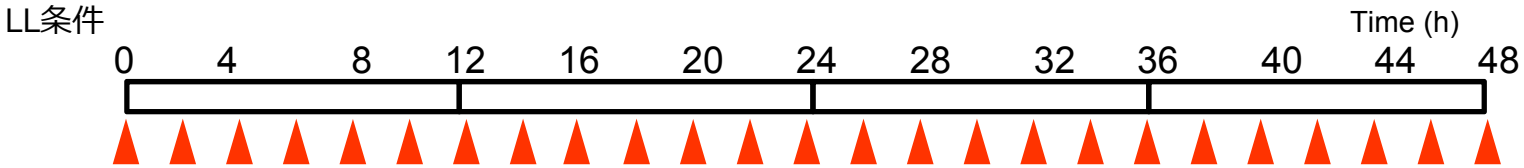
愛媛大学・太陽光植物工場



「参照データ」

大阪府立大学・人工光植物栽培システム





2 h-sampling for the transcriptome

Ehime Univ.

時系列トランスクリプトーム

多検体RNA-seq解析

葉切片を2日間に渡って
2時間毎10サンプル取得

光合成活性の高い
上層部の葉を対象

HiSeq

Agilent Bioanalyzer 2100

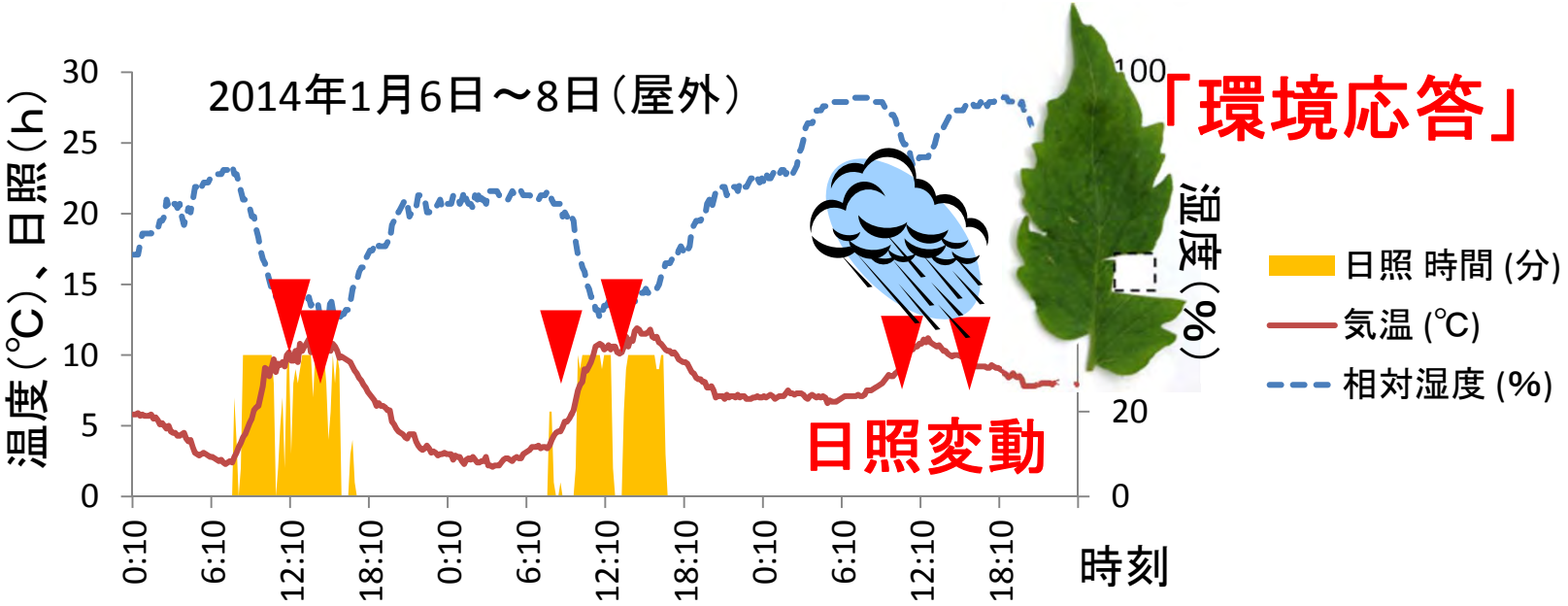
「情報・科学に基づく農業」（野口先生）
「オミクス情報利用SCA」（野並先生）
「ロボット化SPA高精度生体情報計測」（高山先生）

PFC

●高精度に「**真の環境応答**」を抽出する

●網羅的な遺伝子発現解析の<u>時系列データ</u>
【時系列トランスクリプトームデータ】

●不規則・複雑に変動する環境パターン　→生物情報「時系列」が必要



PFC

4. 大阪府立大学　植物工場研究センターの取組

①センター概要

②大規模遺伝子発現解析のプラットフォーム

研究拠点　大阪府立大学植物工場研究センター

公立大学法人大阪府立大学　21世紀科学研究機構

植物工場研究センター

完全人工光型植物工場の要素技術開発からビジネス化・人材育成まで

要素技術開発
光源，空調，栽培，制御，エネルギー，自動化，機能性作物，ゼロウエイスト，分子診断，センサー，ユニバーサル

インテグレーション化
ランニングコスト縮減，省力化，高効率栽培，制御ネットワーク，サイエンス農業，資源循環，環境配慮

プラント標準化
デバイスやシステム標準化
デバイス標準化，モジュール化，小規模，量産規模，被災地向け

ビジネスモデル化 人材育成
採算型・複合型植物工場運営，デバイス・プラント・メンテナンスビジネス，普及・展示

コストダウン → **新世代植物工場**

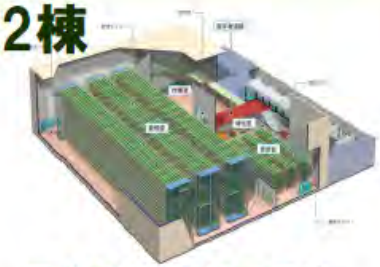
C20棟

経済産業省
「先進的植物工場施設整備事業」
空調、照明、自動化等の植物工場に関する要素技術の研究開発施設

C21棟

農林水産省
「モデルハウス型植物工場実証・展示・研修事業」
葉菜類、コケの栽培技術実証及び展示、研修施設

C22棟



平成26年5月竣工予定
経済産業省
「イノベーション拠点立地推進事業」

研究開発棟　　実証棟　　産業実装棟

研究拠点　大阪府立大学植物工場研究センター

PFC 植物工場研究センター
R&D Center for the Plant Factory

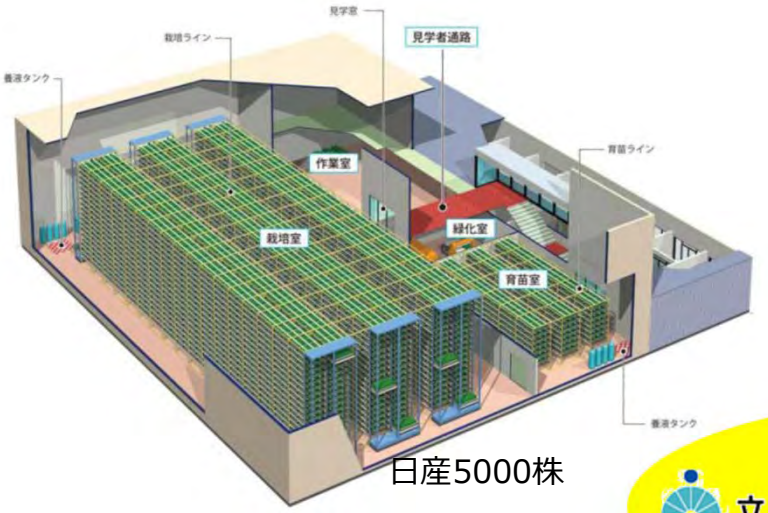
ビジネス

ベンチャー企業　2013設立

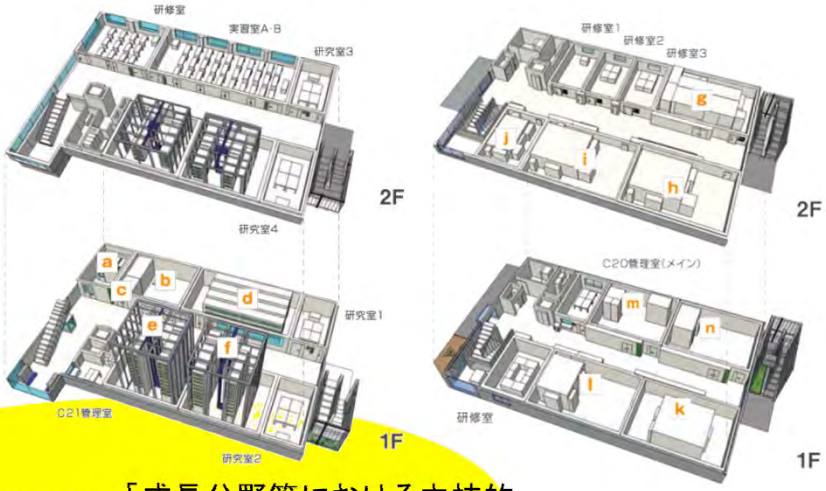
コンソーシアム企業（約90社）

日産250株

産業実装



日産5000株



実証

文部科学省　「成長分野等における中核的専門人材養成」事業(2014)

技術開発

基礎研究

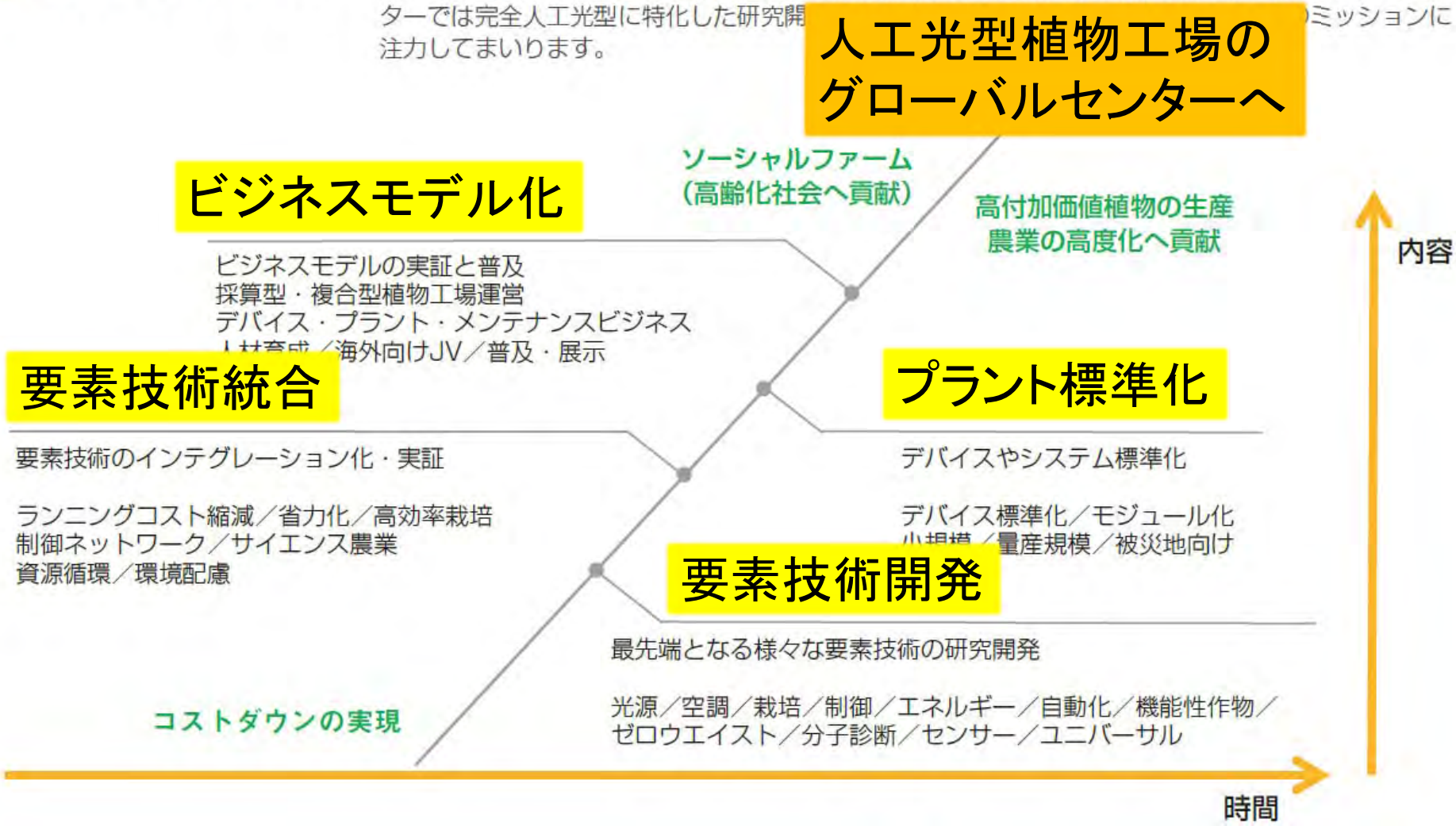
産業実装棟（経産省）
2014 経済産業省

実証棟（農水省）
2011 農林水産省

R&D棟（経産省）
2011 経済産業省

研究開発の方向

植物工場は、広範な技術要素で構成されており、企業１社でカバーできるものではなく、複数企業や大学等で構成する有機的な連携体制による研究開発の迅速化や高度化が求められています。当センターでは完全人工光型に特化した研究開 ミッションに注力してまいります。



ビジョン

植物工場におけるソフトウエア開発は、急進的に、そして革新的に、「経験則ベース」から「サイエンスベース」へと移行しつつあります。

ICT導入の次のステップとして、「生命科学に基づいた生体診断・予測・制御」に関する技術導入が予想されます。

本研究室では、研究開発者の視点から、アグリビジネスにおけるソフトウエア開発を加速する新たなプラットフォームを提供します。

ソフトウエア研究開発の予測

環境制御　2010
自動制御技術

生体や市場の診断・予測　2013
ICT、ビッグデータ解析

生体診断・予測の高度化　2015
トランスクリプトーム解析

生体制御　2020
ゲノム科学・数理科学

研究開発リソース

- 栽培環境の最適化
- デバイスプラント開発
- 品種改良
- 安全安心トレーサビリティ

Clockmics

- データ生成
- データ解析

ナレッジシステム

- リファレンス配列
- マイニング手法
- モデリング手法

研究開発ニーズ

植物生産の次世代ソフトウエア開発に向けて
個別研究から研究リソース活用の時代へ

アグリビジネス　植物工場　スマートアグリ　ICT　薬用植物
異常気象　トレーサビリティ　遺伝子組換え植物　食の安全安心

- **トランスクリプトームデータ＊を試してみたい**
- **バイオマーカーの探索のために、基礎データが欲しい**
- **研究論文のための先端的データが欲しい**
- **膨大なトランスクリプトームデータを低価格で取得したい**

超多検体のRNA-seq解析からデータ解析までを支援

＊トランスクリプトーム（transcriptome）とは、細胞中に存在する全てのmRNAの総体を意味します。トランスクリプトームはあらゆる遺伝子の発現の総体であるため、生物の置かれた環境によって構成が異なります。したがって、トランスクリプトームは生物の置かれた環境の指標となり得ます。一方で、いわゆるゲノムは環境が異なっても生物内で同一であり、生物の置かれた環境の解析指標としては利用できません。

ご清聴ありがとうございました。