

第137回勉強会: 植物工場の始まりと技術発展史、そして未来を語る

日本における人工光型植物工場の中期以降の発展史
および今後の展望 - Covid-19以降を見据えて -

2020年5月14日以降配信

古在豊樹 (植物工場研究会)

本日の話題

- 自己紹介
- 光源の発光効率の年次推移
- 蛍光灯植物工場の商業化
- 赤色LEDと白色LEDの植物工場商業化
- 人工光植物工場における照明の基本
- 最近の動向と今後の方向性
- 人工光型植物工場の本質的な利点
- 植物照明の基本的視点

古在豊樹グループの主な研究課題と研究期間

恩師: 三原義秋、高倉直、矢吹万寿、渡部一郎

1970	1980	1990	2000	2010	2020
------	------	------	------	------	------

- 園芸施設的环境制御 (光、暖房、保温、換気、細霧冷房、CO₂施用)、モデリングとシミュレーション
- 光独立栄養 (無糖培地) 培養による植物苗の増殖と生産
- 閉鎖型システムによる植物苗と薬用植物の生産
- 人工光型植物工場における植物成長と物質・エネルギー収支
- 植物の環境応答 (光合成・蒸散・CO₂施用、二次代謝物生産)

謝辞

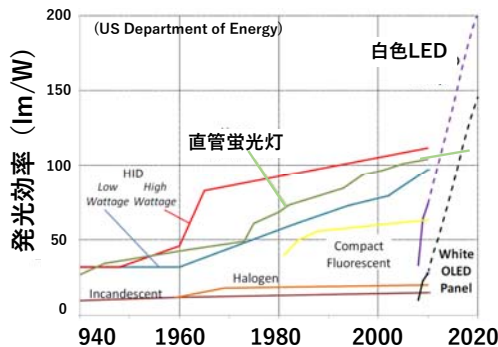
- 旧同僚: 林真紀夫, 北宅善昭, 富士原和弘, 久保田智恵利, 全昶厚, 後藤英司, 石神靖弘
- 学位取得者: 富士原和弘, 久保田智恵利, 宮下好恵, 渋谷俊夫, 大山克己, 星岳彦, 瀬古住子, 西村将雄, 賀冬仙, 梁燦錫, Genhua Niu, Jenny Aitken, Handarto, Chalernpol Kirdmanee, Lok Yee Hin, Amed Abdel-Ghany, Jongwook Heo, Quynh Thi Nguyen, Xiao Yulan, Watcharra Chintakovid
- 博士課程学生 (部分的指導): 横井慎吾, Marcio Couceilo, 西村徹, 戸井田宏美, Kriengkrai Mosaleeyanon, Tong Yuxin, Li Ming, Padarane Thammathon
- 主なポスドク研究員: SMA Zobayed, Fawzia Afreen, Hyeon-Hye Kim
- 主な客員研究員: Byong Ryong Jeong, 金容顕, J. Adelberg, Sandra Wilson

人工光型植物工場における主光源の変遷



HPS: High Pressure Sodium lamp 高圧ナトリウム, FL: 蛍光灯

各種光源の発光効率 (luminous efficacy) の年次推移



2014年、高効率青色LEDを発明した赤崎勇、天野浩、中村修二の3氏にノーベル物理学賞

1990年代における蛍光灯植物工場の研究と商業化

論文例: 谷村泰宏、池田彰、江崎謙治、河相好孝、中山繁樹、岩尾憲三、蔭山裕之 (1991) 蛍光灯を用いた人工光型植物工場の研究 (その1) 栽培システムの諸元ならびに性能試験結果、生物環境調節, 29(2):81-88. (三菱電機 中央研究所)

商業化例: 高柳式蛍光灯植物工場 (神奈川県厚木市)



国内での蛍光灯植物工場の研究は1990年初頭に三菱電機が開始したが、最初の商業化例は2000年の高柳栄夫による栽培棚10段の高柳式蛍光灯植物工場(ET-ハーベスト)である。明期16時間、照度 5000 ~ 8000 lxでリーフレタスなどを栽培。播種後約3週間で定植し、その後約2週間で収穫。同様なシステムに焼肉用サンチュ栽培に徹した山形県米沢市の「安全野菜工場」がある。またM式水耕研究所も蛍光灯多段の植物工場「アーバンファーム」を千葉県柏市に建設した(高辻正基(2007)に準拠)。

閉鎖型植物苗生産システムの開発研究



千葉大学・閉鎖型システム(1998年)
3棚 x 5トレイ = 15トレイ
制作: 大山克己
(当時は博士院生、現在は大阪府立大学教授)

閉鎖型植物生産システム(千葉大学園芸学部)

7段 x 4列、2000年に本格稼働開始。養液かん水(村瀬治比古)やプラグトレイ運搬(豊田自動織機)などは自動化、クリーン環境(新菱冷熱)、知能化環境制御(星彦彦)、テクノバおよびトヨタ自動車との共同研究開発。



21世紀初頭の代表的な蛍光灯植物工場の例

- ・アーバンファーム 柏工場 2000年1月稼働開始



アーバンファーム
白尾格 社長
千葉県柏市



- ・スプレッド 亀岡プラント 2007年竣工



稲田信二
代表取締役社長

人工光利用閉鎖型植物苗生産システム

2003年に大洋興業株(当時)岡部勝美らが苗テラス(商品名)を商品化(現:三菱ケミカル)。千葉大学園芸学部・全昶厚らがプロトタイプを開発



愛媛県・ベルグアース、静岡県・アメーラ、次世代施設園芸事業などで全国的に導入

2000年初頭における閉鎖型植物苗生産システム開発の意義

- ・植物工場での葉もの野菜生産では電気コストが生産コストの30%超だが、苗生産では5%前後。
- ・蛍光灯の発光効率が100 lm/Wに近づき、蛍光灯下で300 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 超の照明が可能となり、利用目的に適した高品質な実生苗、接ぎ木苗の生産が可能。
- ・安定した光・温湿度・気流制御およびCO₂施用による成長促進と品質向上が周年可能。害虫侵入が防げる。

閉鎖型植物生産システム(人工光型植物工場)の開発

LED植物工場

- 研究論文(ウィスコンシン大グループ): Bula, R.J., Morrow, R.C., Tibbitts, T.W., Barta, DJ., Ignatius, R.W., and Martin, T.S., (1991) Light-emitting diodes as a radiation source for plants. HortScience. 26(2): 203-205.
- 赤色LED植物工場
- 白色LED植物工場
- RGB(+UV,FR)比率・強度・周期が可変なLED植物工場
- 光環境と他の環境要因の制御が統合された植物工場

世界初の赤色LED植物工場が静岡県に1998年に建設される

- 1996年、三菱化学(当時の)渡邊博之氏が内山久和氏に栽培データ等を提供し実験設備開発の協力を依頼。
- 1998年、静岡県磐田市豊田町に赤色LED植物工場(鉄骨、1階、10段、床面積135 m²、栽培面積800 m²)の実用化施設が完成。後に、蛍光灯の育苗施設を増設。
- 施主、栽培：農事組合法人サンフィールド(代表金原士朗) 水冷式の赤色LEDで主にサニーレタス「コスモリーフ雅」を栽培。
- 2000年秋に本格的な生産を開始。生産能力:180万株/年。2006年までに、全国で6か所でLED植物工場が稼働
- 開発・設計・施工：コスモプラント(1990年設立、代表内山久和)
- その後、米国のアリゾナ大学、フロリダのNASAを渡邊、内山と一緒に訪問。
- 2001年1月15日JNN近未来SP「びっくり仰天未来生活」、4月14日フジテレビFNNスーパーニュース「ウイークエンドジャーニー」で「LEDを使った促成栽培」として4分間放映される。2001年 外務省の海外110か国向け日本紹介番組「Japan Video Topics」で4分間紹介される。
- 2005年5月18日NHK「クローズアップ現代」、雑誌Wedgeの11月号で2ページにわたり紹介される。 出展：渡邊博之(2008) 第2章人工光を用いた植物工場。アグリフォトニクス. 18-28. シーエムシー出版

世界で初めて商業生産された赤色LED植物工場(静岡県磐田市)

写真提供:内山久和



赤色(水冷)LED植物工場

- コスモファーム岩見沢は2003年12月に北海道の岩見沢市に稼働開始し、現在まで連続稼働(福祉法人クビドフェア身障者を雇用)
 - 2400株~3200株/日を取穫、年間80万パックを出荷。
 - 学校給食、スーパーマーケット、デパート、都内料理店等に毎日出荷。
 - 赤色LEDの効果でレタス特有の苦みや青臭さが少なく、柔らかくもシャキシャキした食感で、葉が大きく葉柄まで甘みがある。
 - 施主：社会福祉法人クビド・フェア(理事長 吉田栄次)
 - 施工：サンパワー株式会社(代表取締役 内山 久和)
- 英語表記：SUNPOWER CO:LTD.
<http://www.cosmosunfarm.co.jp>

コスモファーム岩見沢



赤色(水冷)LED植物工場

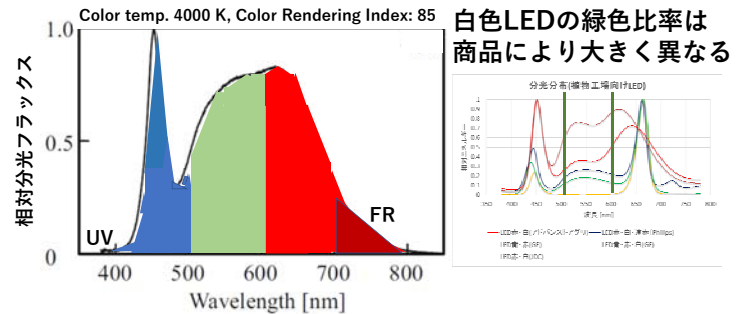
- コスモファーム岩見沢は2003年9月に北海道の岩見沢市に稼働開始し、現在まで連続稼働(福祉法人クビドフェア身障者を雇用)
<http://cosmosunfarm.co.jp/04system/cosmo.html>
- 2400株~3200株/日を取穫し、学校給食、スーパーマーケット、デパート、都内料理店等に毎日出荷(年間80万パック)。
- 赤色LEDの効果でレタス特有の苦みや青臭さが少なく、柔らかくもシャキシャキした食感で、葉が大きく葉柄まで甘みがある。
- 施工者:サンパワー株式会社/英語表記：SUNPOWER CO:LTD.
- 法人登記証明番号 0828-01-002038号
- 代表者：代表取締役 内山 久和

バイテックベジタブルファクトリー



バイテックベジタブルファクトリー(石川県鹿島郡中能登町) 2021年秋までに10万株/日(200g超)/株)の全自動工場を着工し、2023年春に稼働予定。「変更が可能な工場」(日本経済新聞朝刊、2020年4月、吉田忠則)

白色LEDの緑色比率は商品により大きく異なる - オフィス用LEDの緑色比率は大きい -



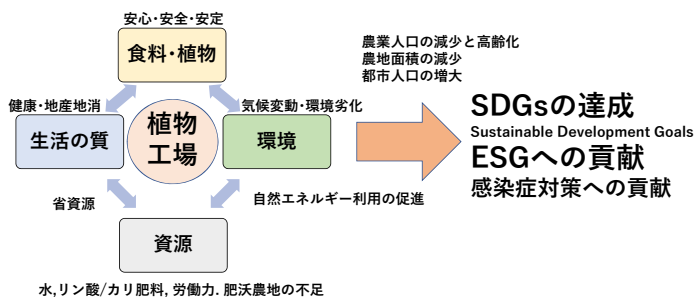
Green light effect 緑色光の多様な効果

- Smith, H.L., L. McAusland and E. H. Murchie. (2017) Don't ignore green light: Exploring diverse roles in plant processes. *J. Exp. Bot.* 68(9): 2099-2110.
- Kim HH, Goins GD, Wheeler RM, Sager JC (2004) Green-light supplementation for enhanced lettuce growth under red- and blue-light-emitting diodes. *HortScience.* 39(7): 1617-1622.
- Johkan, M., K. Shoji, F. Goto, Hahida, S-n., Yoshihara, T. (2012) Effects of green light wavelength and intensity on photomorphogenesis and photosynthesis in *Lactuca sativa* L. *Environ. Exp. Bot.* 75: 128-133.

最近の動向と今後の方向性

- グローバルな状況
- 対象作物
- 本質的な利点
- 資源利用効率、資源生産性、金額生産性

植物工場は、食料・植物の安定・高品質・省資源生産だけでなく、 環境・資源・生活の質の問題の同時並行的な解決に貢献する



2018年以降のグローバル・ビジネスの特徴

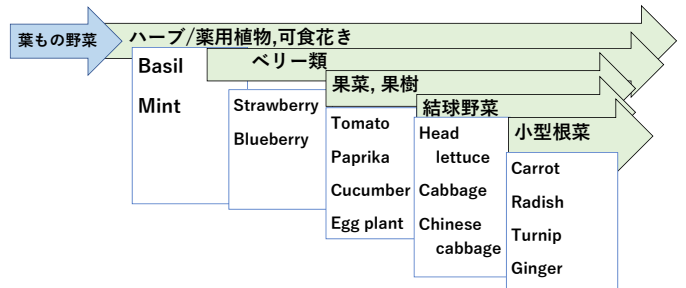
- 100~500億円規模の投資家の参戦
- 多種企業 (IT、食品、ゼネコン、量販店、電力、LEDメーカー、ハウスメーカー・機械メーカー)の参入・再参入
- 果菜類・薬用植物生産などの商業化への挑戦
- 人工光植物工場専用品種の開発
- 都市システム・下水処理、キノコ、養殖、発酵産業との統合
- スケーラブル(scalable)・スマート工場の開発(AI, IoT)

LED植物工場ビジネスの課題

ー電気コスト比率が低下し、人件費・減価償却費の比率が高まる

1. 自動化・ロボット化・人材育成
 - 1) 播種、一次・二次移植、**収穫、調整**、運搬、包装、出荷。洗浄・衛生
 - 2) 稼働率最適化 (人材、装置・機器、配車、受発注) --> 利益率・販売率増大化
 - 3) 生産性の向上と最適化(環境設定値、生産計画・管理、資源配分)
2. 大型化と分散化のビジネス戦略
スケールメリット、人材確保、運賃・時間・遅延リスク、地産地消
3. 商品開発・マーケティング: 品質向上、価値創造、マーケット創造
果菜類、ハーブ・薬用植物、根菜など
飲料・食品添加物、サプリメント、化粧品、芳香剤、医薬品・漢方薬
4. 現システムの改善から革新的次世代システムの開発へ
5. SDGs、ESG、Covid-19への対応

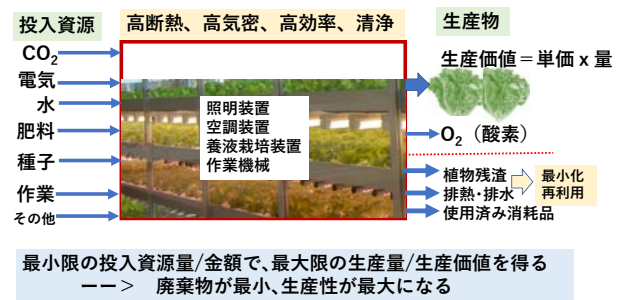
葉もの野菜・苗生産に引き続き期待されている植物工場生産植物の商業化



人工光型植物工場の本質的な利点

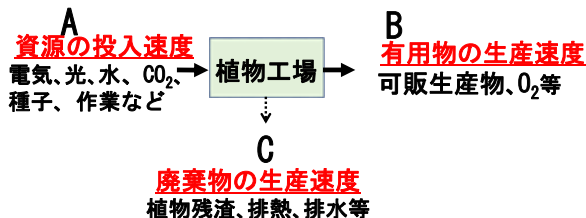
- ①環境、②植物特性、③資源投入および④栽培管理に関する高精度の連続的計測データから、資源利用効率、資源生産性、金額生産性などを算定し、それらを内訳と共に可視化できる。
- 植物特性の計測に高性能・安価な各種カメラを有効に利用できる。ネットワーク化、データベース化、スマート化が容易。
- 上記システムの構築により、各種の採算性の継続的な向上が可能になる。(この利点を生かせなければ…)
- 生産と並行して、育種用個体選別を継続的・並行的に実施できる。個体変異の原因を、遺伝、環境、栽培管理に自動分別する。

植物工場における投入資源と生産物



資源利用効率(RUE, Resource Use Efficiency)

$$\text{各資源のRUE} = \text{B中のA/A} = 1.0 - \text{C中のA/A}$$



資源の投入と価値の生産の基本に返って考える

- 資源利用効率(=生産資源量/投入資源量)
- 資源生産性(=生産量/投入資源量)
(電気生産性、労働生産性、栽培面積・時間生産性、全資源生産性)
- 金額生産性(=販売単価/資源単価)x資源生産性

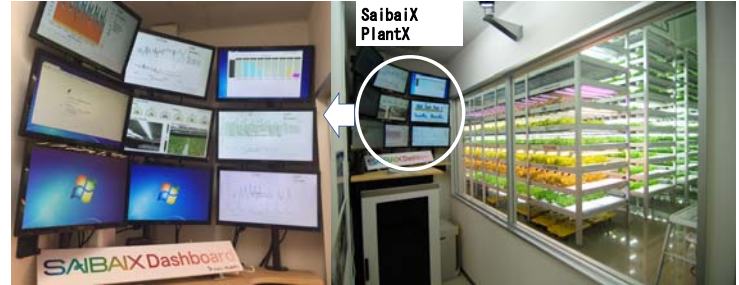
各投入資源の利用効率 (RUE) の実測例

資源の種類	理論的最大値	植物工場	園芸施設
水	1.0	0.96	0.02-0.03
CO ₂	1.0	0.88	0.4-0.6
肥料(N, P, K 等)	1.0	0.8-0.9	0.5-0.7
種子	1.0	0.95	0.8-0.9
光エネルギー	0.11	0.027	0.017
電気エネルギー	0.06	0.007	-----

Ohyama et al. (2002; 2005; 2006); Yokoi et al. (2005)

Copyright© 2018 JFPA All rights reserved.

千葉大学・人工光型植物工場 (6号棟) の見える化 (2016年) 葉もの野菜、床面積406 m²、栽培室338 m²、栽培棚10層、9列、生産能力約250kg/日



日本におけるレタス生産植物工場の 資源生産性および金額生産性の範囲例

投入資源の種類	資源生産性 (P _R)	金額生産性 (P _M) (kg/1000円)
電気エネルギー	0.11 - 0.14 kg/kWh	6.45-7.55
作業時間	7.7 - 10.0 kg/h	5.91-7.0
栽培面積・時間	0.25- 0.33 kg/m ² /d	4.82-6.45
その他	-	6.09-8.27
合計	-	1.66- 2.19

土地代金、宣伝費などのコストは含まれていない

(JPFA, 2019) 33

数種作物の金額生産性の試算例 (Kozaiら, 2019)

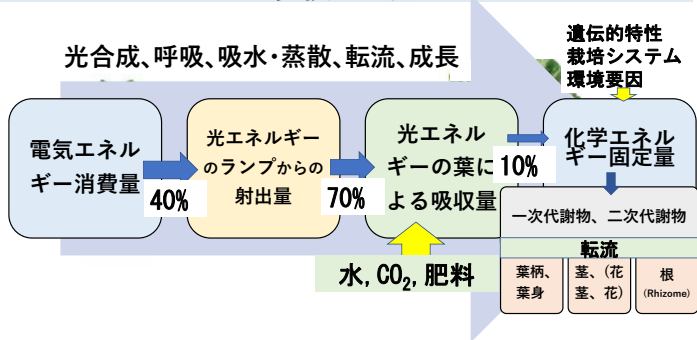
項目	リーフレタス	イチゴ	ミニトマト	コメ
卸売り価格 (円/kg)	1,200	1,600	500	300
収量 (kg m ² y ⁻¹)	69	20	100	3.8
年間売上げ (千円/m ² /y)	83	32	50	1.5
年間生産コスト (千円/m ² /y)	59	117	173	293
年間の生産額/生産コスト	1.4	0.27	0.29	0.0039

(Kozai et al., 2019)

6/22/2020 1:49:04 PM

34

生産物の経済価値 (=単価 x 収量) を決める エネルギー変換と代謝のプロセス



35

植物照明の基本的視点

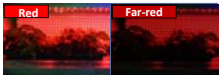
- 電気コストの70%以上は光合成のための照明コスト
- 光形態形成のための照明コストは低いが、生産物の経済価値に影響大
- 光以外の環境要因は照明効率を最大にするために制御する
- 照明効率を最大化には植物群落の全葉への光の均等照射が重要
- 光形態形成は光質だけでなく、他の環境要因と植物の生理状態に影響される
- 光合成と光形態形成は相互作用がある
- 最適光環境は時間変化する→動的な光環境制御、動的環境制御

紫外(UV)、青(B)、緑(B)、赤(R)、遠赤(FR)の照射強度、明暗周期、照射方向を自由に制御できるが、その無数の組み合わせの植物成長への効果は従来の研究方法論では解明が困難



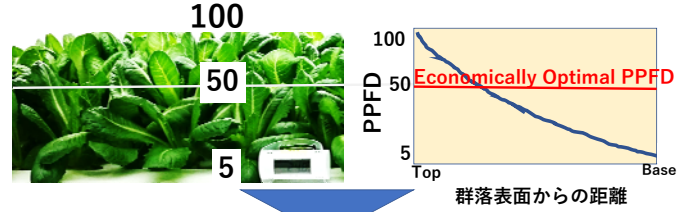
White (= B+G+R (+UV+FR))

- UV, B, G, RおよびFRの：
 - 1)各フォトン域の束密度
 - 2)各フォトン域の比率
 - 3)各フォトン域の照射周期
 - 4)各フォトン域束密度の群落内3次元分布
 - 5)上記の各変数の経時変化
- 各フォトン域の照射方向(下、上、横)



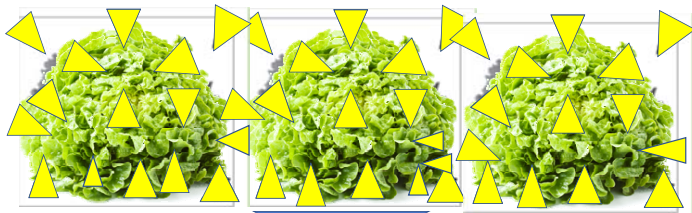
PPFDと気流速度は密集群落内では急激(指数関数的)に減少

相対 PPFD(光合成有光量子束密度)：



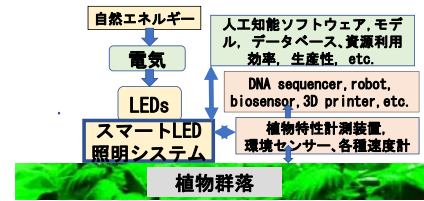
群落下部は光不足で葉が黄化・枯死。隣接した植物体同士で光の競争が生じ、群落全体の光合成成長が抑制される。

植物体・植物群落の光合成成長を最大化するには、あらゆる葉のあらゆる部分のPPFDを均一化するのが良い。

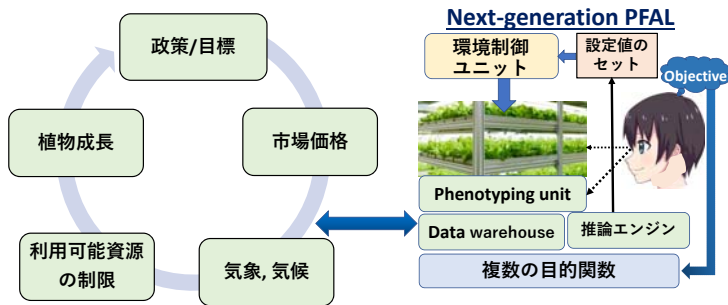


PPFDだけでなく、光質、気流速度、CO2濃度、水蒸気密度、葉温の空間分布も可能な限り均一化することを基本し、場合によっては意識的に不均一にする。

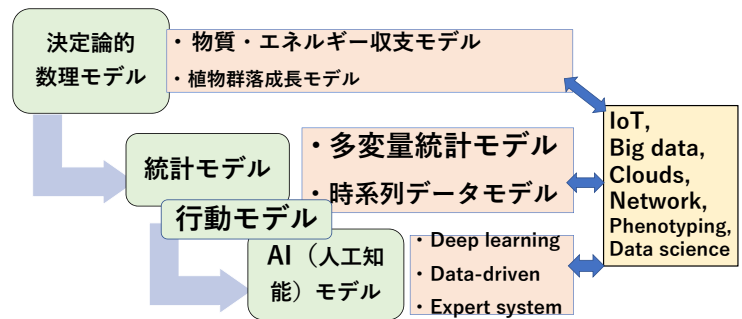
エネルギー自律・スマートLED照明システムと周辺装置



複数評価関数の最大化のための複数環境要因設定値の同時決定のためのAIとData Warehouseを利用したソフトウェアの開発

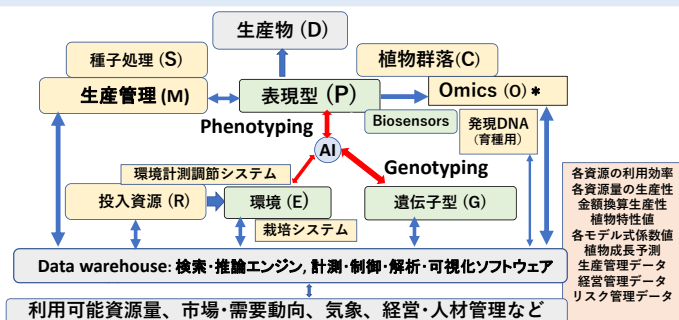


植物工場で利用される4種類のモデル



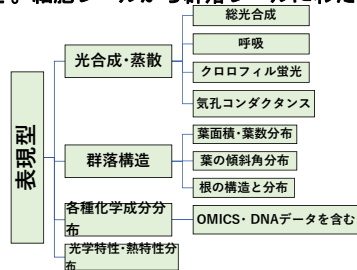
次世代PFALを用いた連続生産と研究開発が一体化された次世代PFALの構成

E, P(Cを含む), M, RおよびDの連続データ、Oの間歇データおよびGのデータの統合解析が可能。
 OMICS: genomics, metabolomics, proteomics, transcriptomicsなどの総称。AI(人工知能ソフトウェア)



植物の表現型の例

非破壊・非接触で植物の構造と機能に関する特性を計測する方法論と手続き。細胞レベルから群落レベルにわたる。



2020/6/22

44

次世代植物工場における中核engineering技術

- 自動化、ロボット化、省力化
- フードサプライチェーン構築
- IoT、ICT、AI技術の導入
- フェノタイピング(phenotyping)技術の導入
- モデリングとシミュレーション・ソフトウェアの開発
- LCA (Life Cycle Assessment)
- 生産管理統合システム
- Scalable, explainable, open, transparent, predictable, traceable, evolutionary, autonomous
- CSM (Cultivation System Module)の開発

次世代植物工場における中核バイオテック・栽培技術

- 人工光型植物工場専用品種の開発
 - 果菜、結球野菜、根菜、果樹、薬草の生産拡大
 - 革新的栽培システムの開発
 - 革新的環境制御システムの開発
 - Omics・分子生物学・ゲノム技術との統合
 - ポストハーベスト技術との統合
- マーカーゲノム百倍化 } 生産性10倍以上

人工光型植物工場専用品種の育成 遺伝的特性 x 環境制御 x 栽培管理

- 高CO₂濃度(1000ppm以上)、低PPFD・長中期で高速成長
- 収穫が容易な形態・特性・商品特性
- 矮性(草丈50cm以下・短節間・芯止まり性)果菜類
- 環境ストレス耐性と虫害・ウイルス抵抗性が不要
- 環境制御で特性(形態、含有成分等)が容易に変化
- 自家受粉性、単為結果性の高品質果菜(例:トマト、イチゴ)
- 植物体中の商品化部位の比率が高い(例:不要根が少ない)
- Speed breedingが容易

結論

- 白色LED植物工場の研究開発はまだ初期段階
- 光環境制御の自由度が多すぎて、最適探索の方法論が未開発
- 光とそれ以外の環境要因の最適組み合わせ方法論も未開発
- 革新的な自動化栽培システム・環境制御システムの開発が必要
- AI、IoT、植物特性計測手法の導入が必須
- 上記の研究開発が進めば生産性は現状の10倍以上になる
- 今後、SDGs、ESGに幅広く貢献する。

閉鎖型苗生産システムの開発と利用
-食料・環境・エネルギー問題の解決を目指して-



古在豊樹編著
1999年初版発行
養賢堂
191ページ

最新の苗生産技術
-閉鎖型苗生産システムの実用化が始まった-



古在豊樹・板木利隆・岡部勝美・大山克己著
2005年初版発行
農業電化協会
150ページ、A4判

人工光型植物工場
-世界に広がる日本の農業革命



古在豊樹著
2012年初版発行
オーム社
228ページ

図解でよくわかる植物工場の基本



古在豊樹監修
2014年初版発行
誠文堂新光社
159ページ、A5判

よくわかる植物工場



古在豊樹監修
2015年初版発行
PHP
63ページ、
変形A4判

Plant Factory: 1st and 2nd edition

-An indoor vertical farming system for efficient quality food production



T. Kozai, G. Niu and M. Takagaki (eds.)

2015 and 2019

Academic Press (Elsevier)

405 pages/
487 pages



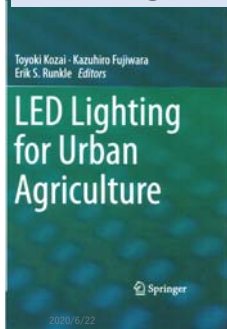
PLANT FACTORY
An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production



Edited by Toyoki Kozai, Genhua Niu and Michiko Takagaki

<https://www.sciencedirect.com/book/9780128017753/plant-factory>

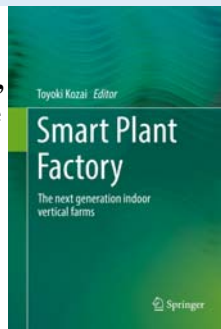
LED lighting for Urban Agriculture



T. Kozai, K. Fujiwara, & E. Runkle (eds.)
2016
Springer
454 pages

Smart Plant Factory

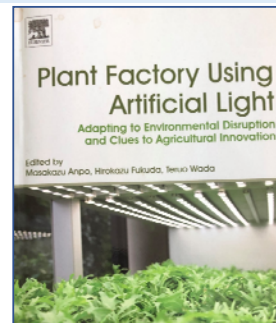
The Next Generation Indoor Vertical Farm



T. Kozai (ed.)
2018
Springer
456 pages

https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-13-1065-2_5

Plant Factory Using Artificial Light
Adapting to Environmental Disruption and Clues to Agricultural Innovation



• Editors: Anpo, M., H. Fukuda, and T. Wada
• Elsevier
• 406 pages

LEDの植物成長へ利用とその効果に関する1990年代の論文の例

- 1) Bula, R.J., Morrow, R.C., Tibbitts, T.W., Barta, D.J., Ignatius, R.W., and Martin, T.S., (1991) Light-emitting diodes as a radiation source for plants. HortScience. 26(2): 203-205.
- 2) Y. Miyashita, Y. Kitaya, T. Kozai, T. Kimura (1995) Effects of Red and Far-Red Light on the Growth and Morphology of Potato Plantlets *In Vitro*: Using Light Emitting Diode as a Light Source for Micropropagation Acta Hort. 393: 189-194.
- 3) Miyashita, Y., T. Kimura, Y. Kitaya, C. Kubota and T. Kozai (1997) Effects of red light on the growth and morphology of potato plantlets in vitro: Using Light Emitting Diodes (LEDs) as a light source, Acta Hort. 418: 228-232.

閉鎖型植物苗生産システム開発の発想

- 植物工場での葉もの生産では電気コストが生産コストの30%超だが、無糖培地の光独立栄養による組織培養苗生産では5%以下。
- 蛍光灯の発光効率が100 lm/Wに近づき、蛍光灯で300 $\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 超が可能となり、健全な培養苗。実生苗、接ぎ木苗の生産が可能。
- 閉鎖型苗生産システムでは、安定した光・温湿度・気流制御とCO₂施用による成長促進が周年可能。害虫侵入が防げる。

閉鎖型植物生産システム(人工光型植物工場)の開発

LED植物工場における光源技術革新と課題

- 光合成有効量子効率(photosynthetic photon flux efficacy)の向上 (3 $\mu\text{mol J}^{-1}$ を超える)
- Red/Far-red(赤/遠赤)比の成長・形態形成・成分への影響
- 遠赤(700-800 nm)(End of Day効果)、紫外放射の照射時期の影響
- 青・赤・緑の交互照射(山口大・Sigyo法、東大・富士原研)
- 青色LED→白色LEDの高性能・低価格化。紫LEDの実用化。
- 白色LEDの緑色比率は商品により10~40%と変動。→緑色効果
- 密集植物群落が一主因となる成長のバラツキ

- チップバーン、葉面の凸凹(水疱、intumescence)などの生理異常

フェアリーエンジェル 京都市北山 2009年11月18日撮影

エンジェルファーム (千葉県野田市、京都市北山、福井県美浜町)
2006年に福井工場の野菜を出荷開始、2008年にシーシーエスが出資、
2012年 シーシーエスは植物工場事業から撤退

