

平成 21 年度戦略的基盤技術高度化支援事業
「HEFL 照明を用いたハイブリッド型植物栽培ユニットの研究開発」

研究開発成果等報告書

平成 22 年 3 月

委託者 近畿経済産業局
委託先 財団法人滋賀県産業支援プラザ

	目次	ページ
第1章	研究開発の概要	1
1-1	研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1-2	研究体制	2
	(1) 研究組織及び管理体制	2
	(2) 管理体制	3
	(3) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名	4
	(4) 知的財産権の帰属	5
	(5) その他	5
1-3	成果概要	7
1-4	当該研究開発の連絡窓口	7
第2章	本論	8
2-1	2重構造の熱線、緑域遮断フィルム、断熱材などの試作・開発・評価	8
2-1-1	熱線と緑波長を遮断する2重構造の熱線・緑域遮断シート・断熱材 などの試作、開発	8
2-1-1-1	透過熱量の測定実験	8
2-1-1-2	分光透過率の測定実験	9
2-1-2	2重構造の熱線、緑域遮断フィルム、断熱材などの評価	9
2-2	HEFL 照明の自動調光システムの開発と評価	11
2-2-1	制御アルゴリズム・ソフトウエア・照明コントローラ・ 照度センサーの開発、実験	11
2-2-1-1	照度センサーの開発、実験	11
2-2-1-2	照明コントローラーの開発、実験	13
2-2-1-3	照度センサーと照度コントローラーの評価	13
2-2-1-4	制御アルゴリズム・ソフトウェアの開発、実験	13
2-2-2	制御アルゴリズム・ソフトウエア・照度コントローラ・ 照度センサーの評価	15
2-3	HEFL 波長特性の研究と評価、機能性野菜の生産システムの開発	16
2-3-1	検体の栽培方法と生重量結果	16
2-3-2	機能性成分の分析	16
2-3-2-1	サンプル調製方法と分析使用量	16
2-3-2-2	総ポリフェノール分析	16
2-3-2-2-1	総ポリフェノール分析方法	16
2-3-2-2-2	総ポリフェノール分析結果	16
2-3-2-3	ビタミンC	17
2-3-2-3-1	ビタミンC分析方法	17

2-3-2-3-2 ビタミンC分析結果.....	17
2-3-3 総合評価と考察.....	17
2-4 植物生育に必要な空調設計の為の気流解析.....	18
2-4-1 シミュレーションでの温度解析結果とユニット栽培室の 温度分布実態把握.....	18
2-4-2 植物を考慮した気流解析.....	18
2-4-3 最適な空調設計の構築	19
2-5 ハイブリッド型植物栽培ユニットの実験・開発・評価.....	20
2-5-1 ハイブリッド型植物栽培ユニットの実験と開発.....	20
2-5-1-1 ハイブリッド型植物栽培ユニットの実験と開発.....	20
2-5-1-2 電力消費量削減.....	21
2-5-1-3 設備投資額	22
2-5-1-4 機能性野菜栽培システム.....	22
2-5-2 ハイブリッド型植物栽培ユニットでの自動調光システムの 実験と評価.....	23
2-5-3 ハイブリッド型植物栽培ユニットの評価	23
第3章 全体総括.....	24

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

1-1-1 研究開発の背景

植物工場の普及は、2008年9月に閣議決定された政府の新経済成長戦略の中で取り上げられ、わが国の将来の経済発展のための重要な方策の一つに位置づけられている。その背景には「食への安全意識の高まり」「食糧自給率の低迷」「農業人口の高齢化」と言った様々な問題がある。これらのことから、今後、農業の工業化とされている「植物工場」が必要な時代へ着実にパラダイムシフトしている。

このような状況において、植物工場の普及における課題は、初期設備投資額をおさえ、日々の栽培経費をいかに低減するかである。

本研究開発では、これらの課題である①初期コストの低減②ランニングコストの低減を図るため、光量・日照時間・室温・養液・気流などの管理項目に着目し、最適化制御システムを組み込んだ植物栽培装置のユニット化(モジュール化)を行い、普及型の「ハイブリッド型植物栽培ユニット」を実現しようとするものである。

1-1-2 研究目的

植物工場普及の課題である設置と運営コストの削減を図るために、ユニット化(モジュール化)した植物栽培装置に、熱源である熱線や緑を遮断した太陽光を効率的に取り入れ、近接のH E F L照明とハイブリッド化する。植物への光量の安定化制御による電力量の削減をしながら、ユニット内の光量・日照時間・室温・養液・気流などを最適化したトータルシステム制御をおこない品質の安定化と機能性野菜生産を実現する栽培ユニットの研究開発をおこなう。

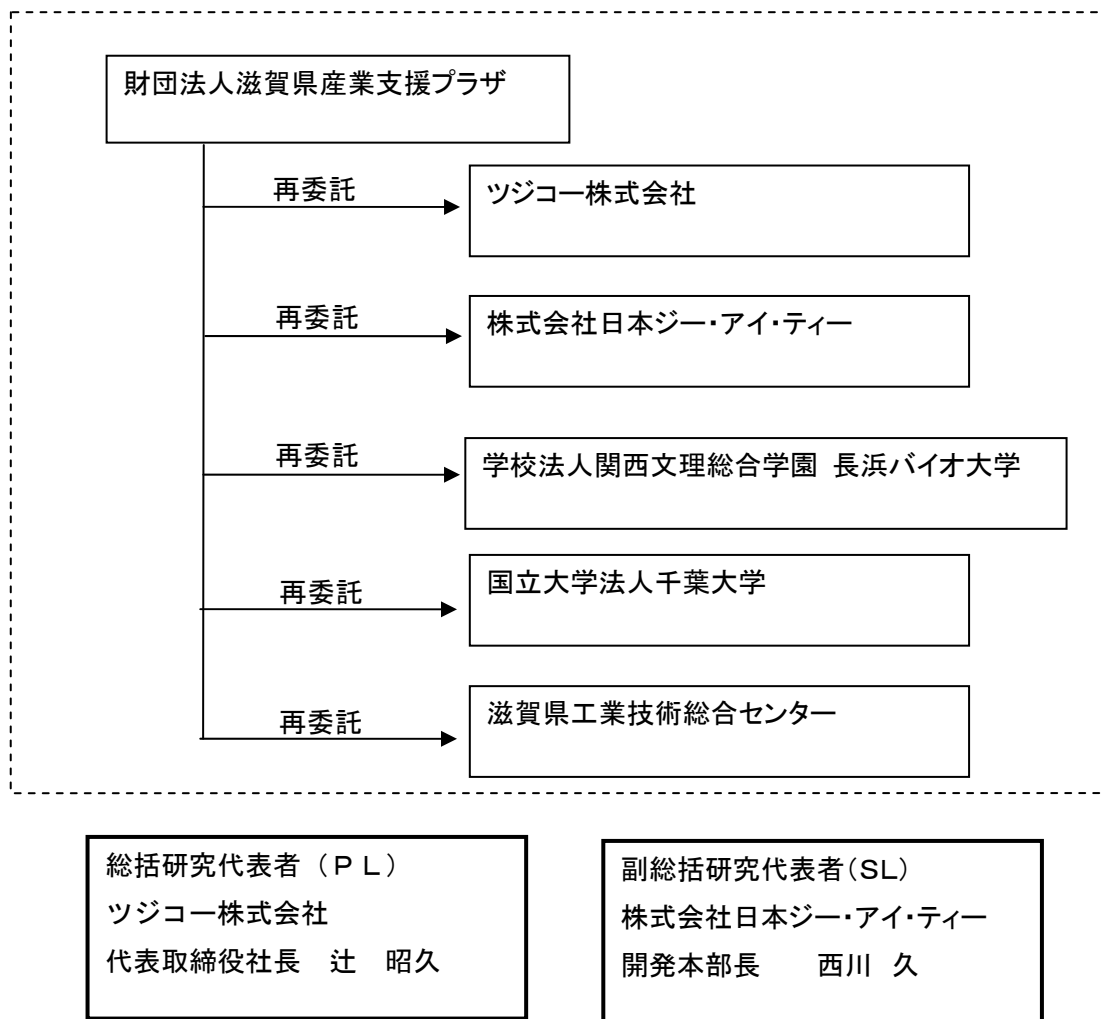
1-1-3 研究目標

上記の目的を満たすため、初期コストとして日産1株当りの投資額10万円以下、ランニングコストとして消費電力量25%削減を実現する「ハイブリッド型植物栽培ユニット」の開発を目標とする。

1-2 研究体制

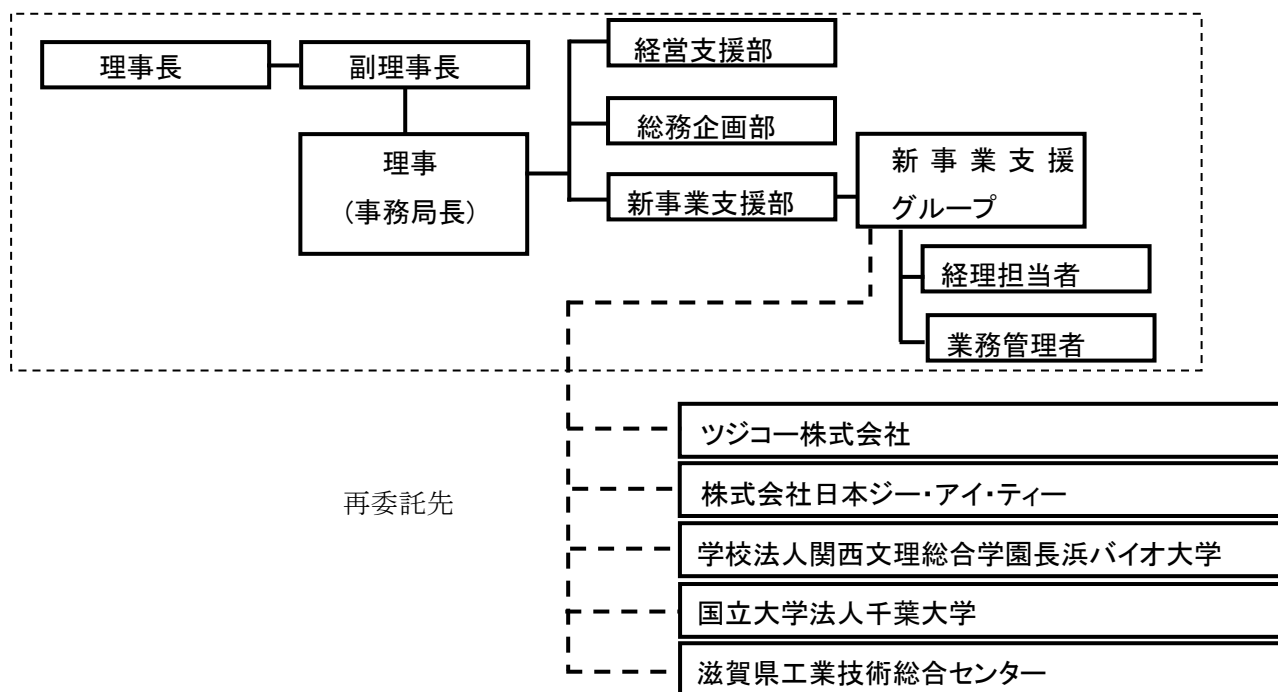
(1) 研究組織及び管理体制

1) 研究組織（全体）



(2) 管理体制

①事業管理者



(2) 管理員及び研究員

【事業管理者】 財団法人滋賀県産業支援プラザ

①管理員

氏 名	所属・役職	実施内容(番号)
西尾 隆臣	新事業支援部 新事業支援グループ 主幹	⑥
菊地 秀一	新事業支援部 新事業支援グループ 研究開発コーディネータ	⑥

【再委託先】

ツジコー株式会社

氏 名	所属・役職	実施内容(番号)
辻 昭久	代表取締役社長	①②③⑤
岡本 陽介	新規事業部 開発エンジニア係長	④
山本 彰	新規事業部 開発エンジニア	①②③⑤

株式会社日本ジー・アイ・ティー

氏 名	所属・役職	実施内容(番号)
西川 久	新規事業開発本部 開発本部長	②⑤
武藤 大助	新規事業開発本部 情報技術部長	②⑤
寺田 勝	新規事業開発本部 開発エンジニア	②⑤

学校法人関西文理総合学園 長浜バイオ大学

氏 名	所属・役職	実施内容(番号)
蔡 晃植	バイオサイエンス学部 バイオサイエンス学科教授	③

国立大学法人千葉大学

氏 名	所属・役職	実施内容(番号)
後藤 英司	大学院園芸学研究科 教授	①⑤

滋賀県工業技術総合センター

氏 名	所属・役職	実施内容(番号)
深尾 典久	機械電子担当 主任主査	①⑤

(3) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

(事業管理者)

財団法人滋賀県産業支援プラザ

(経理担当者)	新事業支援グループ 主幹	西尾 隆臣
(業務管理者)	新事業支援部 部長	神本 正

(再委託先)

ツジコー株式会社

(経理担当者)	経営管理部 経理主任	宗時 早苗
(業務管理者)	代表取締役社長	辻 昭久

株式会社日本ジー・アイ・ティー

(経理担当者)	情報技術部長	武藤 大助
(業務管理者)	開発本部長	西川 久

学校法人関西文理総合学園 長浜バイオ大学

(経理担当者)	産官学共同研究・事業開発センター センター員	南部 祐身
(業務管理者)	バイオサイエンス学部 バイオサイエンス学科 教授	蔡 昇植

国立大学法人千葉大学

(経理担当者)	園芸学部会計グループ専門職員	石 和 剛
(業務管理者)	大学院園芸学研究科教授	後藤 英 司

滋賀県工業技術総合センター

(経理担当者)	管理担当 主幹	横江 泰典
(業務管理者)	機械電子担当 参事	月瀬 寛二

(4) 知的財産権の帰属

知的財産権は全て当方に帰属することを希望。

(5) その他

他からの指導・協力者名及び 指導・協力事項

①推進委員会

氏名	所属・役職	備考
辻 昭 久	ツジコー株式会社 代表取締役社長	PL
岡 本 陽 介	ツジコー株式会社 開発エンジニア 係長	
山 本 彰	ツジコー株式会社 開発エンジニア	
西 川 久	株式会社日本ジー・アイ・ティー 新規事業開発本部 開発本部長	SL
武 藤 大 助	株式会社日本ジー・アイ・ティー 新規事業開発本部 情報技術部長	
寺 田 勝	株式会社日本ジー・アイ・ティー 新規事業開発本部 開発エンジニア	

蔡 晃 植	学校法人関西文理総合学園 長浜バイオ大学 バイオサイエンス学部 バイオサイエンス学科 教授	
後藤 英 司	国立大学法人千葉大学 大学院園芸学研究科 教授	
深尾 典 久	滋賀県立工業技術総合センター 機械電子担当 主任主査	
石川 憲昭	アイマーケ株式会社 代表取締役	アドバイザー
高辻 正基	東京農業大学 客員教授	アドバイザー
森田 清和	有限会社サン愛ブレンド 代表取締役	アドバイザー
田井中 俊行	デリカフーズ株式会社 経営企画部部長	アドバイザー

②アドバイザーの指導・協力

氏 名	指導・協力事項
石川 憲昭	ハイブリッド型植物栽培ユニット⑤において、目標であるランニング・投資コスト削減について、検証や評価方法について、アドバイスを頂く。
高辻 正基	1974 年より植物工場の研究を開始されている。その経験と高い知見から①②③項目、さらには⑤項目の栽培ユニットの栽培環境についてなど研究項目について、総合的なアドバイスを頂く。
森田 清和	独自の優れた水耕栽培技術をお持ちで、③項目の機能性野菜栽培方法や⑤のハイブリッド型ユニットでの栽培技術方法についてアドバイスを頂く。
田井中 俊行	三重大学と野菜の機能性を定量化するための医学的評価方法の研究を進めておられ、③⑤項目において機能性野菜栽培技術や評価方法に関してアドバイスを頂く。

1-3 成果概要

本研究開発で以下の成果が達成できた。

1. 2重構造の熱線緑域波長遮断方法の試作・開発・評価
緑域遮断シートの開発を行ない、これと赤外域遮断フィルムを組み合わせ、断熱性と太陽光の波長選択性を有する窓構造の開発を行なった。
この構造により日射量 75%遮断することが可能となった。
2. HEFL 照明の自動調光システムの開発と評価
太陽光の光量子量に応じて HEFL 照明の出力を制御し、HEFL 照明の約 16%の省電力化を行うことが出来た。
3. HEFL 波長特性の研究と評価・機能性野菜の生産システムの開発
HEFL 照明の波長成分を調整することにより、特定の栄養素が高くなる野菜栽培が可能となった。
4. 植物育成に必要な空調設計の為に気流解析
最適な排気ダクトの位置、ファンに風量及び取り付け場所、棚の配置などについて解析ソフトウェア「ストリーム」を用いた気流解析を行なった。
室内温度は設定温度に対して $\pm 5^{\circ}\text{C}$ に収めることが出来た。
5. ハイブリッド型植物栽培ユニットの実験・開発・評価
開発したハイブリッド型植物栽培ユニットについて実験評価を行い下記の日標を達成できたことを確認した。
(ア)太陽光併用による HEFL 照明電力 25%削減
(イ)初期投資金額の日産 1 株あたり 10 万円以下

また本研究の過程で以下の 2 件の特許出願を行なった。

1. 光入射角度変更用ブラインド
太陽高度に応じてブラインドを調整することによりハイブリッド型植物栽培ユニットへの光線入射角度を改善しより多くの光量子量を取り入れることが出来るようにした。
2. 太陽光併用型植物工場用遮熱断熱窓装置
太陽光から緑域波長を遮断する特殊シートと赤外域を遮断するフィルムの 2 重構造に光量子量入射角度変更用ブラインドを組み合わせ、ハイブリッド型植物栽培ユニットへ熱の侵入を抑えつつ、植物栽培に必要な光量子量を最大限取り入れる窓装置を開発した。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

財団法人滋賀県産業支援プラザ

新事業支援部

滋賀県大津市打出浜 2 番 1 号コラボしが 2 1 2 階

電話 (077)511-1414

FAX (077)511-1418

2-1 2重構造の熱線、緑域遮断フィルム、断熱材などの試作・開発・評価

2-1-1 熱線と緑域を遮断する2重構造の熱線・緑域遮断シート・断熱材などの試作、開発

2-1-1-1 透過熱量の測定実験

断熱測定箱を用いて、各種断熱フィルム、ガラス等の透過性能を評価した。

測定項目は、太陽光からの放射エネルギーである日射量 (W/m^2) と植物栽培に関する光量子量 ($\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$) で、外部環境での値と各種材料を透過した数値を測定した。

i) 窓構造

以下の窓構造について測定をした。

①：透明フロート複層ガラス 3mm、アルゴンガス層 12mm に遮熱ウインドフィルム 3M ナノ 80S を貼りつけ

②：高遮熱複層ガラス 3mm、アルゴンガス層 12mm
(ガラス自体に遮熱コートがしてあり、遮熱ウインドフィルムのコスト削減が期待できる)

③：透明フロート複層ガラス 3mm、アルゴンガス層 12mm に 3M ナノ 80S を貼りつけ
＋緑域カットシート (3mm ガラス貼り付け)
(植物栽培への寄与が少ないと考えられる可視光線の緑色波長域を遮断することにより日射量を減少させ、冷房電力の削減が期待できる)

④：高遮熱複層ガラス 3mm、アルゴンガス層 12mm＋緑域カットシート (3mm ガラス貼り付け)
(植物栽培への寄与が少ないと考えられる可視光線の緑色波長域を遮断することにより日射量を減少させ、冷房電力の削減が期待できる)

ii) 測定結果の考察とまとめ

断熱測定箱での、透過率をまとめると下記表 2-1-1 になる。

表2-1-1各種窓構造での光量子量と日射量の透過率比較

各種窓構造での光量子量と日射量の透過率	平均透過率(%)	
構造	光量子量	日射量
複層3mmガラス＋3Mナノ80S	71	42
複層3mmガラス＋3Mナノ80S＋緑域カットシート	32	25
高遮熱複層ガラス3mm	68	53
高遮熱複層ガラス3mm＋緑域カットシート	32	33

表から、ハイブリッド型植物栽培ユニットへの窓構造としては、光量子量透過量と日射量透過量から、複層ガラスに 3M ナノ 80S フィルムを貼り、さらに単層ガラスに緑域カットシートを貼りつけた構造を採用した。

2-1-1-2 分光透過率の測定実験

分光透過率を測定することにより、各種組み合わせより今回の最適な構造を評価した。

試料は 10cm 角ガラスに 3M ナノ 80S、緑域カットシートを貼りつけ栽培ユニットの窓構造での分光透過率を測定する。

高遮熱ガラスはサンプルの入手が出来なかったため、メーカーの開示データと今回の緑域カットシートのデータから推測することとした。

入射角の変化に対しては測定できないのでガラス法線面での透過率となる。

測定は滋賀県工業技術総合センターにて実施した。

i) 測定結果

3M ナノ 80 S を複層フロートガラス 4mm に貼り付けた場合の分光透過率を図 2-1-1 に示す。複層フロートガラスでの透過率低下が加わるため、可視光線域での透過率劣化が出る。赤色領域での透過率の低下が大きいことがわかる。

今回新たに開発した緑域カットシートは緑域では透過がほとんど無く波長 546nm では透過率は 0.4% である。青領域では波長 435nm では 41% の透過率で波長 425nm では 51% の透過率である。赤領域では波長 700nm で 80% である。当初の目標である青域、赤域で透過率 50% 以上、緑域 5% 以下の目標は達成できたと考える。

ハイブリッド型植物栽培ユニットの窓構造（複層 4mm ガラスに 3M ナノ 80 S 貼り付け＋単層ガラスに緑域カットシート）での分光透過率を図 2-1-2 に示す。最終的組み合わせでの透過率は青域は約 30%、緑域はほぼ 0%、赤域では約 50% となる。

ii) 測定結果の考察

分光透過率測定で、特に緑域カットシートの特性が確認できた。第一の目標である緑色領域の遮光には成功した。植物生育に重要な赤色領域も 80% の透過率が確保でき、青色領域の透過率も 50% を確保できた。

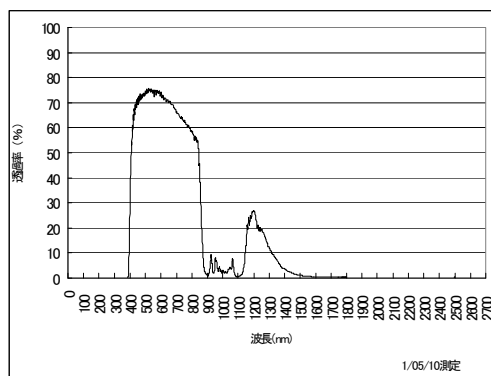


図 2-1-1 分光透過率
(複層ガラス+3Mナノ80S)

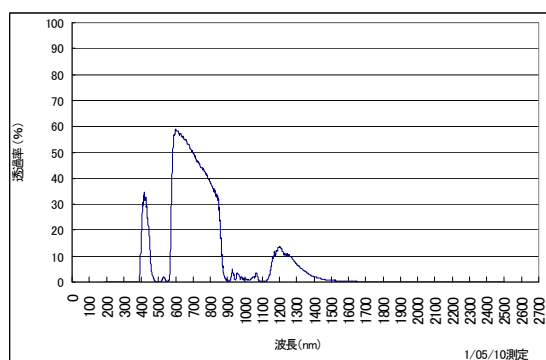


図2-1-2 分光透過率
(複層ガラス+3Mナノ80S+緑域カットシート)

2-1-2 2重構造の熱線、緑域遮断フィルム、断熱材などの評価

測定実験結果から、窓構造は、太陽光を受ける南側の室内側に透明フロートガラス複層サッシ（アルゴン層 12mm）に赤外域を遮断するための 3M 製ナノ 80S を貼り付け、室外に

緑域遮断シートを内貼りする 2 重構造を採用した。また壁については、ケイカル板(6mm)、石膏ボード(12mm) スタイロフォーム(50mm)に外側に通気層を設け構造用合板貼り付けその上に鋼板サイディング貼り付け構造でよいとの結果を得た。

採用した窓構造について、分光透過率を計測評価した結果、当初目標とした、青赤域は透過率 50%以上、緑域透過率 5%以下を達成した。

2-2 HEFL 照明の自動調光システムの開発と評価

2-2-1 制御アルゴリズム・ソフトウェア・照明コントローラー・照度センサーの開発、実験

2-2-1-1 照度センサーの開発、実験

光合成に必要なエネルギーの元は、光量子でありまたその測定には於いては専用のセンサーを必要とするという前提がある。しかしながら、使用されているセンサーは、業界で標準的に使われていることもあり、他に選択肢が無い為に、価格が非常に高価であることから、低コストで照明調光装置を開発することが実現不可能という結論を早い段階で決めることにした。代案として照度センサーを使用し光量子センサーとの互換テーブルを作成して制御することを試みる。

i) センサー選択

測定が必要な照度の範囲は先々実験で明らかにあると思うが、開発を進めるためには選択を先に行わなければならない。シンプルで且つ、必要な範囲の照度が測定できるものを検討する。センサーの選択には幾つかの要素を比較検討しなければならないその要素とは、使用電圧、出力方式、感度、3色タイプ、実装方法等である。

使用電圧は、駆動に 1.2V を使用することは可能であるが出力が 0 – 1.2V の範囲になるとそれを ADC で読み取りプログラム処理するには出力電圧のレンジ切り替えなどの回路、プログラム等が複雑になる。回路構成は 3.3V 統一か、5V の 2 系統で検討する。

出力方式には、Digital、電流、電圧の方式があるが、照度と出力の関係が比例、反比例の形態のものが、実際にサンプルを入手し、照明を照射しその出力を確認した。

a: 選択したセンサー

アルワン電子 : AC-419

センサー出力電圧 2.5 – 0V の範囲で、0 – 10 万 lx が測定できる。

センサーの特性に関して、3 種類の LED (赤、黄緑、橙) でセンサーに照射して

特性がどのようになるかを測定した結果を示したのが図 2-2-1 である。カタログ値に対して電圧が高めに出ているがそれは、Gain Amp 1.02 倍換算と比較すると、センス電圧の違いは小さいことがわかるまた、変化の仕方も一様に同じであることが分かる。

ii) センサー構成

第一に検討しなければならないのが、設置位置である。照明調光装置にセンサー

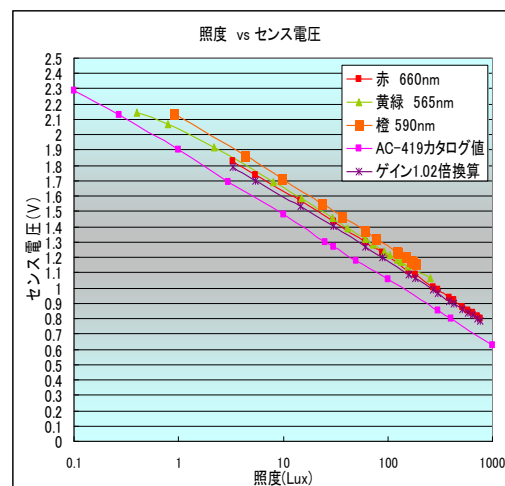


図 2-2-1 光源の違いによる出力

を埋め込む事でシンプルなH/Wの構成を前提にしていたが、HEFL と太陽光を同時にセンスできるように設置できるであろうか、また、照明調光装置が影を作り栽培の妨げにならないか等を考えると

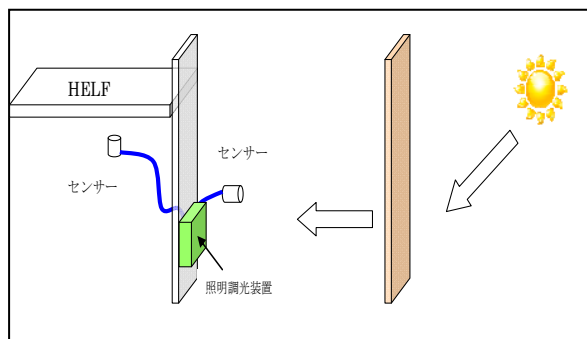


図 2-2-2 設置イメージ

センサーの設置位置はある程度自由度が無いと設備に対応することは困難になる。そこで、センサーと機器を独立させることことにした、また 1 つのセンサーで HEFL と太陽光の混ざり合った照度を測定することは設置位置や、太陽光の入射角に大きく依存することになるので 2 つの光

源に対して 2 つのセンサーを持つことでの確にセンスできるのではないかと考えた。(イメージ 図 2-2-2) ここで再度検討しなければならないことが 3 点ある。1 点目は、ケーブルの長さによる電圧の減衰、と 2 点目は、HEFL の電磁ノイズの影響を受ける可能性が高くなる、3 点目ケーブルの種類という点である。ここでは、ケーブルを LAN ケーブルを使って影響の度合いを検証する実験を行った。

電圧降下の確認を、LAN ケーブルの一端にセンサーを取り付けたカードを接続し、反対側からセンサーを駆動する電圧を供給し且つセンサーの出力電圧を読み取り行なった。このとき電圧降下を確認するためにセンサーの側の電圧も読み取り比較を行った。1m のケーブルでは、減衰量は 2-3mV 程度であった。減衰量は、一定で補完テーブルを作成して制御するため、ケーブルで延長することは現実的である。

実際の照明に連動させてセンサーの出力波形を測定すると約 10mV 程度のノイズが載っていることを確認できた。制御装置側で光量子値に変換させてモニターを行うと常にグラフが変動し正しい値を判断できなかった。ソフトウェアで平均化等の対策を行ったが、変動を消すことができなかった。このままだと常に H E L F 照度を調光しなければならない状態になる。次に、ハードウェアでセンス電圧の回路にフィルターを入れて低周波のノイズ成分を抑えるという対策をいれた。これに表示されるグラフを安定させることができた。

2-2-1-2 照明コントローラーの開発、実験

i) ブロック図を下(図 2-2-3)に示す。

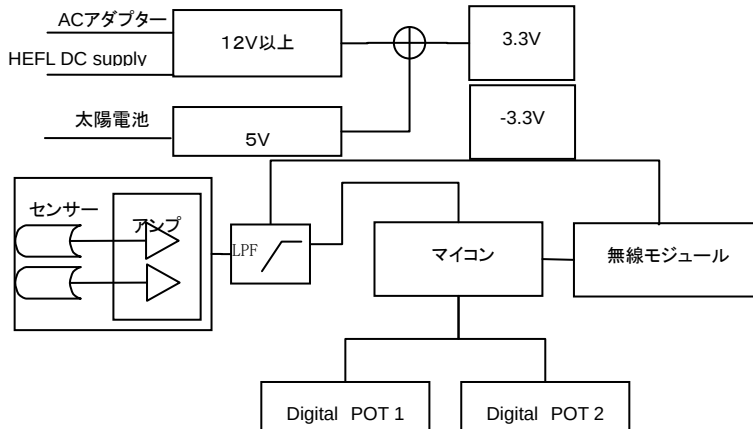


図 2-2-3 ブロック図

2-2-1-3 照度センサーと照度コントローラーの評価

実際の照明を使用し、調光装置が設計通りに動作できることを確認する。高電圧の電磁界ノイズの影響、制御範囲、などの点の評価する。

制御範囲はDigiPot とボリュームの両端に現れる電圧を比較して、照明の制御電圧が一致していることが確認出来た。(図 2-2-4)

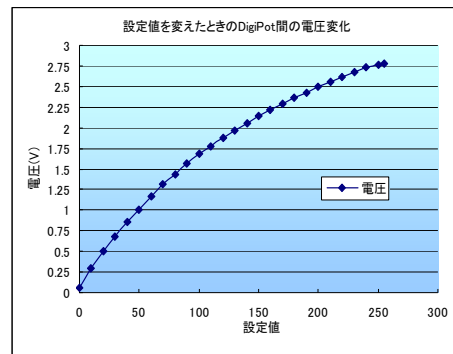


図 2-2-4 出力電圧測定

電磁ノイズは、照明インバータから受動するノイズがセンス電圧に影響を与えるためフィルター回路を挿入して対策をとった。

ソフトウェアは、無線を介して Host 間のデータの授受とその値を基にして、2 系統の調光用の DigiPot を可変させることを確認出来た。

2-2-1-4 制御アルゴリズム・ソフトウェアの開発、実験

調光制御ボックスは各センサーUNIT を 6~12 秒間隔で順番に起動させ、各センサーUNIT は 1~4 分に一度センサー情報(太陽/HEFL 光量)を調光制御ボックスに送る。送られたセンサー情報を元に最適な HEFL 光量になるように設定値を計算し各センサーUNIT に送る。各センサーUNIT は送られた設定値(HEFL 光量)になるように PIC マイコンが HEFL 光量を調整する。

当初センサー値のバラツキが大きくなるユニットが存在し、調光の設定値が短時間に大きくバラつく可能性があったので AVERAGE10 方法を用いバラツキを吸収す

るようにした。

また調光方式であるが 1 灯 1 灯 HEFL センサーと太陽光センサーがつけられておりそのセンサー値により調光をおこなってもいいのだがセンサー値のバラツキやセンサーが柱の影になったりガラス窓のそばに車が止まる場合も出てきたので太陽光は南側と北側の面での最大値 (MAX) か平均値 (AVERAGE) で調光するようにした。制御アルゴリズムを図 2-2-5 に示す。

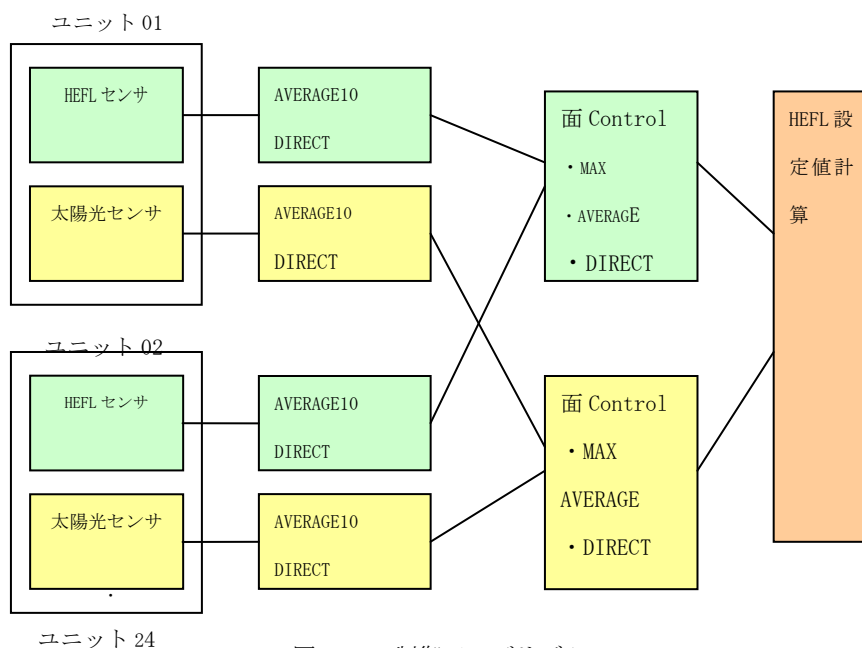


図 2-2-5 制御アルゴリズム

ZigBee 無線 UNIT の OPERATION MODE を SLEEP MODE か WAKEUP MODE の選択ができる。
(通常は SLEEP MODE で行う予定であった)

SLEEP MODE は DATA を転送する時に 5 秒間起動し、転送後は SLEEP 状態になるので節電にもなる。WAKEUP MODE は DATA を転送後も通電したままで次の転送時まで待機する。ただし色々実験を行った結果 SLEEP MODE では SLEEP 状態から抜け出さないユニットが出てきたので、現在は WAKEUP MODE での稼働となっている。SLEEP

MODE に入ってしまったユニットは制御ボックスからコマンドを出しても受付けないのである。各センサー UNIT は設定値から ±50% の範囲で HEFL 出力を調整できる。

図 2-2-6 は実際の OPERATION 時の GUI の画面図である。



図 2-2-6 制御 BOX

2-2-2 制御アルゴリズム・ソフトウェア・照明コントローラー・照度センサーの評価

自動調光式コントローラーの設定は太陽光からの光量子量が $150 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ を下回った場合に、HEFL 照明の出力を制御し HEFL 照明からの光量子量と太陽光からの光量子量の合計が $150 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 以上になされている。今回、太陽光からの光量子量を測定し、そのときの HEFL 照明の出力電力と光量子量を測定し、合計の光量子量が $150 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 以上に制御されているかを評価した。測定結果を表 2-2-1 に示す。HEFL 用のインバーターの制御範囲は最小電力が 66W であるのでこれ以上少ない出力では制御できないので、太陽光 μmol が $100 \mu\text{mol}$ 以上では HEFL 出力電力は最小の 66W に固定されているので、合計光量子量は $200 \mu\text{mol}$ になるがこれは問題ない。太陽光 μmol が $100 \mu\text{mol}$ 以下では HEFL 出力電力が計画通り制御されており、合計光量子量が $160 \mu\text{mol}$ から $180 \mu\text{mol}$ になるように制御されているのが確認できた。太陽光 μmol と HEFL μmol の関係をグラフにしたものが図 2-2-7 で、太陽光 μmol が下がると HEFL μmol が増加しているのがわかる。またその時の太陽光 μmol に対する HEFL 出力電力の関係を図 2-2-8 に示す。ハイブリッド型植物栽培ユニットへ入ってくる太陽光の光量子量が少なくなると、HEFL 照明の消費電力が増加しているのが理解できる。今回の測定で自動調光式コントローラシステム（制御アルゴリズム・ソフトウェア・照明コントローラー・照度センサーの一式）は仕様の能力を示し、HEFL 照明の電力消費の削減に効果がある事を確認した。

表2-2-1 太陽光量子量とHEFL光量子量

太陽光 μmol	HEFL電力(W)	HEFL μmol	合計 μmol	合計 μmol
128	66	68	196	262
137	66	68	205	271
95	73	80	175	248
99	74	84	183	257
98	76	90	188	264
68	84	102	170	254
80	84	102	182	266
62	89	110	172	261
62	90	113	175	265
50	95	125	175	270
37	100	132	169	269
39	101	134	173	274
6	113	154	160	273

図 2-2-7 で、太陽光 μmol が下がると HEFL μmol が増加しているのがわかる。またその時の太陽光 μmol に対する HEFL 出力電力の関係を図 2-2-8 に示す。ハイブリッド型植物栽培ユニットへ入ってくる太陽光の光量子量が少なくなると、HEFL 照明の消費電力が増加しているのが理解できる。今回の測定で自動調光式コントローラシステム（制御アルゴリズム・ソフトウェア・照明コントローラー・照度センサーの一式）は仕様の能力を示し、HEFL 照明の電力消費の削減に効果がある事を確認した。

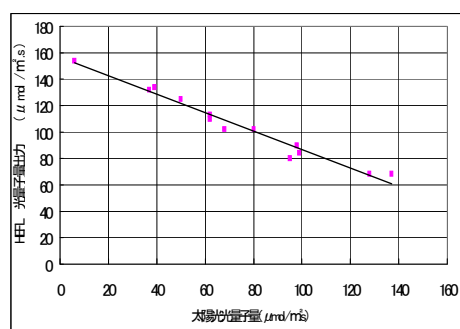


図2-2-7 太陽光光量子量とHEFL光量子量出力

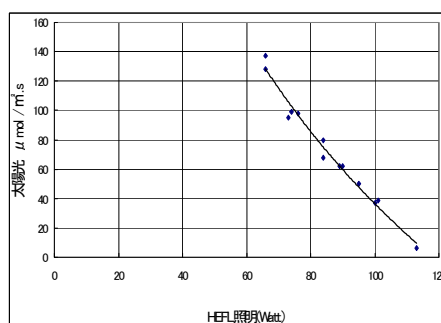


図2-2-8 太陽光光量子量とHEFL消費電力

2-3 HEFL 波長特性の研究と評価、機能性野菜の生産システムの開発

HEFL の様々な波長が、野菜の機能性成分に及ぼす影響を検討した。レタスでもアントシアニン色素を多く含むフレンジーレッドについて白、赤、青、紫系の赤 青比率 75:25, 90:10, 50:50, 10:90, 25:75 の 8 色の波長制御を利用し、ポリフェノールとビタミン C の分析をおこなった。

2-3-1 検体の栽培方法と生重量結果

検体は、EC、pH を管理した養液を用い、室温 $22 \pm 2.0^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $70 \pm 10\%$ 、で制御した室内において、900mm×700mm の HEFL 下に 18 株を栽培した。各波長の照射は収穫前 14 日間とし、それまでは白を照射して

栽培した。実験模様と株の代表例を写真 2-3-1 に、生重量結果を図 2-3-1 に示す。

生重量は、白と比較して赤で増加し、青と紫では白と遜色のない結果であった。

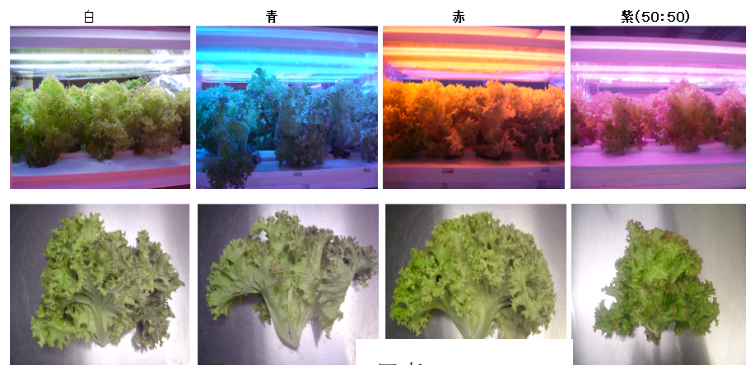


写真 2-3-1

2-3-2 機能性成分の分析

2-3-2-1 サンプル調製方

法と分析使用量

検体 3 株を細かく切断、混和後、一定量分取し、サンプルとした。各項目につき 2 サンプル使用し、1 サンプル当たり 2 回分析を行った。ポリフェノールに関しては、これを 3 回繰り返して分析値を得た。

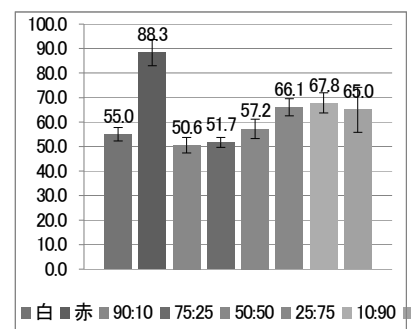


図 2-3-1 フレンジーレッド生重量(g)

* 紫系は赤:青の比率を示す(以下の図同様)

2-3-2-2 総ポリフェノール

2-3-2-2-1 分析方法

総ポリフェノールは、80%メタノールで抽出した後、Folin-Denis 法を用いてカテキン換算で定量を行った。

2-3-2-2-2 分析結果

図 2-3-2 に分析結果を、図 2-3-3 に白を基準としたときの増減率を示す。

白と比較して、紫で総ポリフェノール量の増加が確認された。そして、その増加は、紫における青比率の増加と比例傾向にあった。また、増減率では、紫のいずれも 20%以上増加していた。

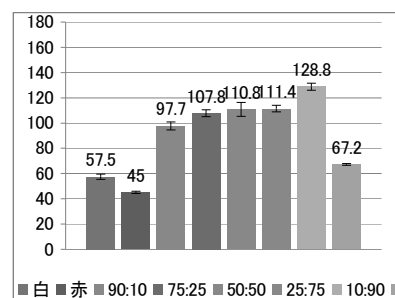


図 2-3-2 カテキン換算による総ポリフェノール量(mg/100g)

2-3-2-3 ビタミンC

2-3-2-3-1 ビタミンC分析方法

ビタミンCは、5%メタリン酸で抽出した後、2,4-ジニトロフェニルヒドラジン法を用い定量を行った。

2-3-2-3-2 ビタミンC分析結果

図2-3-4にビタミンCの分析結果を、図2-3-5に白を基準としたときの増減率を示す。

ビタミンCにおいても、白と比較して、紫で分析値の増加が確認され、増減率も、紫のいずれも20%以上増加していた。そのうち、紫50:50

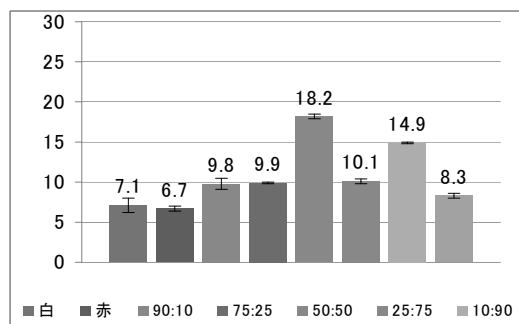


図 2-3-4 ヒドラジン法によるビタミンC量 (mg/100g)

で特に高い増加がみられた。

2-3-3 総合評価と考察

白と比較して、生重量は赤で大きく、青、紫で遜色のない結果であり、総ポリフェノールとビタミンC含有量は共に、赤で小さく、青、紫で大きいという結果であった。成分別で見ると、ポリフェノールは紫全体で高く、ビタミンCにおいては赤と青の比率が50:50の紫が特に高かった。以上から、フリンジーレッドでは、白よりも紫を用いることで、ポリフェノールとビタミンCが、共に増加し、特に赤青比率50:50の紫を用いることで、両成分をバランスよく高めた機能性フリンジーレッドが生産できることが示された。

ハイブリッド型植物栽培では、太陽光と人工光において、紫(50:50)の波長照射を利用すれば、機能性フリンジーレッドが栽培できることが理解された。

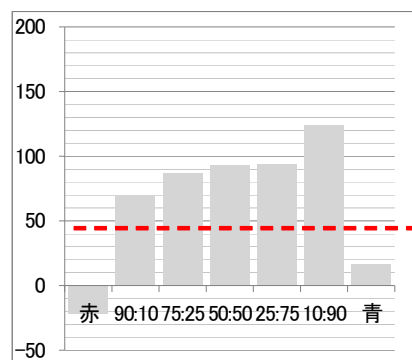


図 2-3-3 白波長を基準とした各波長の増減率 (%)

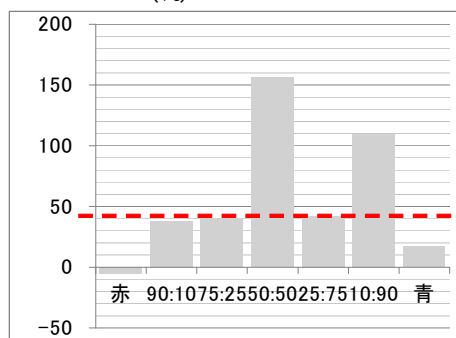


図 2-3-5 白波長を基準とした各波長の増減率 (%)

2-4 植物生育に必要な空調設計の為の気流解析

ハイブリッド型植物栽培ユニット内の植物生育に最適な環境構築を行なう為、三次元熱流体解析シュミレーションシステム（STREAM）を用いて、室内目標温度 $25^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ の空調管理が行なえる空調設計を目的とする。

2-4-1 シミュレーションでの温度解析結果とユニット栽培室の温度分布実態把握

解析モデルを作成し、解析を行なった結果と、実際のユニット栽培室温度の実態把握を行なった。双方の相関性の確認方法として、シミュレーション解析から、ランダムに選んだ5箇所の温度分布結果と、実際のユニット内の、温度分布を、ペンレコーダーを用いて測定を行なった。解析モデルの概略を図2-4-1に、双方の測定箇所の概略を図2-4-2に示す。

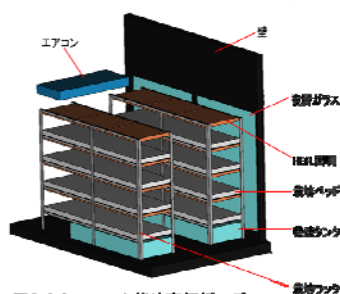


図2-4-1 ユニット栽培室解析モデル

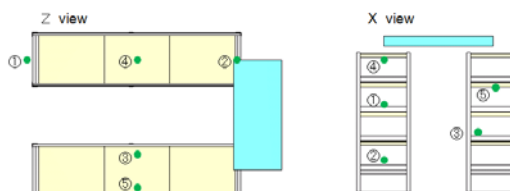


図2-4-2 温度分布測定箇所

i : 測定結果

シミュレーションでの温度分布、実ユニット内での温度分布結果を表2-4-1に示す。

	ポイント①	ポイント②	ポイント③	ポイント④	ポイント⑤
温度解析シュミレーション値	22.3℃	22.6℃	22.3℃	24.2℃	24.1℃
実ユニット実測値	23.0℃	22.8℃	23.0℃	24.5℃	24.2℃

表2-4-1 温度分布相関表

表から、解析シミュレーションでの温度分布と、実ユニット内の温度分布の差異は、最大で 0.7°C 、最小で 0.1°C と、ほぼ相関がとれていると判断できる。

2-4-2 植物を考慮した気流解析

2-4-1 の調査結果から、双方のデータに相関性があったことから、次に、今後成長していく植物を考慮し、現行のモデル（栽培棚の位置、空調の吹き出し角度など）で、収穫時期のレタスを想定した植物（障害物）を解析モデルに追加し、気流解析を行なった。

i : 解析結果

現行モデルで、植物を設置した場合、障害物が増えることにより、気流の流れが悪くなり、気流温度も $25^{\circ}\text{C} \sim 28^{\circ}\text{C}$ の温度分布となる。また、現行のエアコン吹き出し方向が斜め 45° の角度で噴射させていることから、低温気流が奥行まで行渡らないまま、エアコンの吸い込み口に戻っていく傾向があると考えられる。

図 2-4-3 に中央部に片寄るエアコンの吹き出しイメージ、図 2-4-4 にユニット内上面からの気流イメージ、図 2-4-5 にユニット内側面からの気流イメージ、図 2-4-6 にユニット内の温度分布を示す。

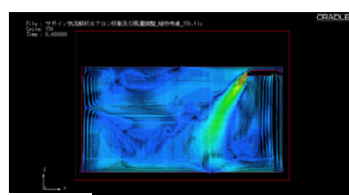


図 2-4-3

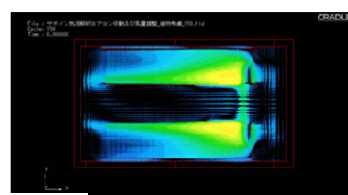


図 2-4-4

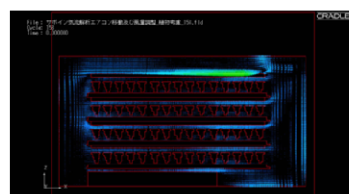


図 2-4-5

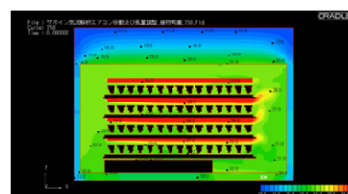


図 2-4-6

図 2-4-5 ユニット側面からの気流イメージ 図 2-4-6 ユニット内 温度分布

2-4-3 最適な空調設計の構築

2-4-2 の解析結果から、ユニット内の気流を効率良く循環させる為に、エアコンの吹き出し角度、送風機の設置を考慮し、解析を行なった。図 2-4-7 に送風機を考慮した解析モデルの概要を示す。

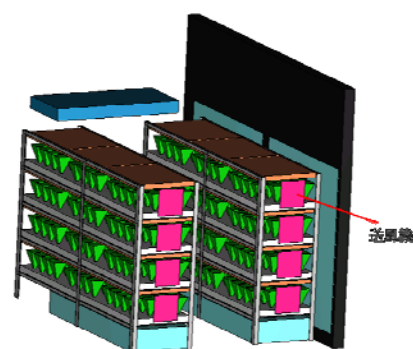


図 2-4-7 送風機を設置した解析モデル

i : 解析結果

2-4-3 の解析モデルを設計することで、気流の停滞、温度が上昇する箇所が減少し、当解析モデルを用いることにより、栽培室内の平均温度は 21℃になった。また今回のテーマである、ユニット栽培室内の目標温度 25℃±5℃で管理できると考える。

図 2-4-8 に中央部に片寄るエアコンの吹き出しイメージ、図 2-4-9 にユニット内上面からの気流イメージ、図 2-4-10 にユニット内側面からの気流イメージ、図 2-4-11 にユニット内の温度分布を示す。

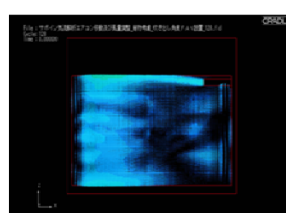


図 2-4-8

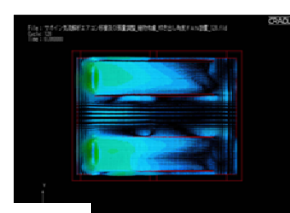


図 2-4-9

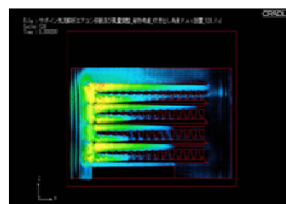


図 2-4-10

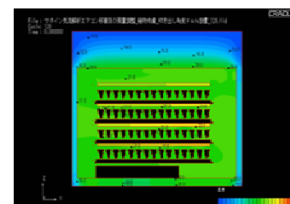


図 2-4-11

図 2-4-10 ユニット側面からの気流イメージ 図 2-4-11 ユニット内 温度分布

2-5 ハイブリッド型植物栽培ユニットの実験・開発・評価

2-5-1 ハイブリッド型植物栽培ユニットの実験と開発

2-5-1-1 ハイブリッド型植物栽培ユニットの実験と開発

太陽光を取り入れ、かつ空調電力削減が図れるユニットを下記の使用で開発した。
今回開発した栽培ユニットの見取り図を図 2-5-1-1 に示す。

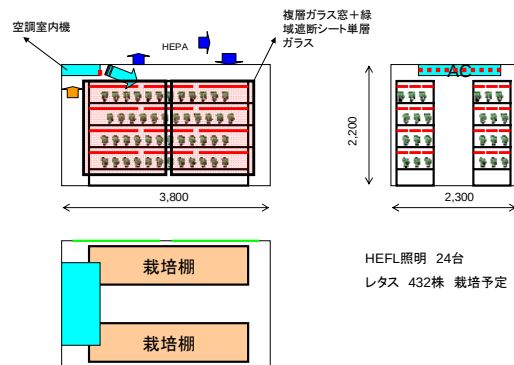


図2-5-1-1 ハイブリッド型植物栽培ユニット

断熱性と遮熱性を高めるため、太陽光取入れ口である、窓部分は複層ガラス（FL3mm＋アルゴンガス層 12mm＋FL3mm）とし、室内側ガラス面に住友 3M 製遮熱フィルム ナノ 80S を貼る。

窓外側南側には 3mm 単板透明ガラスを用いたアルミサッシを取り付け、空間にブラインドを設けると共に、アルミサッシガラス面に緑域カットシートを取り付け可能とした。アルミサッシのガラス面は透明ガラスでも使用できるように交換用サッシを用意した。

また、壁面、床面は断熱性能を向上するためスタイロフォーム 30mm を採用し薄壁でも断熱性能を確保した。

屋根は断熱性と遮熱性の向上を図るため、空気層を儲け上下に断熱層を設けるとともに、空気層の空気換気を行い、特に夏季の熱の室内へ伝導を減少させる目的でファンを設置した。

室内の空気清浄が可能なように HEPA（High Efficiency Particulate Air Filter）を設け必要に応じて空気循環を行なうことが出来る構造とした。また、栽培ユニットの入退出時にスイッチで HEPA をタイマー運転し、陽圧を加えて外部からの害虫類の侵入を抑制できる構造とした。

空調機は栽培室内の栽培実験棚の HEFL 照明からの発熱と太陽光、外気による日射熱、伝導熱から室内温度を一定（23℃から 27℃位）に保つため、11Kw の冷房能力の空調機を設置し、室内側では天井から室内機を吊り下げて空調することとした。

電気消費量が 30 分間隔で記録できるモニターを設置し、空調電力消費量と HEFL 照明電力消費量を解析して、太陽光併用により消費電力の削減が可能か検証できるようにした。

その他、監視システムを導入して、室内温度、湿度、二酸化炭素濃度、液肥電導度の監視を行い異常発生時には担当者への警報を発信できるようにした。

実験から、今回の栽培ユニットでは緑域カットシートを取り付ける外付け単層ガラスサッシと 3M ナノ 80S 遮熱フィルム貼り付けの複層ガラスの空間に、木製ブラインドを取り付け表面に遮熱シートを貼りつけて、太陽光が当たった場合に、取り入れる光量子量の増加を実験する。木製サッシは表面が平らなことから、反射板としては最適である。

完成したハイブリッド型植物栽培ユニットの写真を下記に示す。

写真 2-5-1-1 は外観で南面には緑域カットシートを貼りつけ可視光線から緑色領域の波長を取り除き室内の日射量による温度上昇を抑えることを目的とする。



写真2-5-1-1 ハイブリッド型植物栽培ユニット外観



写真2-5-1-2 ハイブリッド型植物栽培ユニット内部

写真 2-5-1-2
は室内で天井には HEPA が見える。
発芽後 16 日間、
ツジコー日野工
場で育成したフ
リルアイス苗を
2 月 6 日にハイブ

リッド型植物栽培ユニットに移植して生育を観察した。移植後 21 日で約 70 g の株を収穫できたので従来の閉鎖型植物工場と同等の栽培が出来ることが確認できた。良好であった。

2-5-1-2 電力消費量削減

2 月 18 日から 22 日までの期間での電力使用量から削減量を求めた。今回導入した監視システムでは光量子量のモニターが可能で毎分ごとの履歴が記録されている。この履歴を使い太陽光からの光量子量が $150 \mu \text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ を超える時間を集計した結果 1 日平均 3.3 時間となった。つまりこの時間は HEFL 電源が OFF されている時間であり、これ以外の昼間では自動調光システムによる省電力化による時間である。このデータから HEFL 照明電源 OFF による電力削減と電圧制御による省電力量を求めた。削減率 15.9% は 1 日の時間に換算すると $24 \text{ 時間} \times 15.9\% = 3.8 \text{ 時間}$ となり、毎日この時間が HEFL 照明の電源を OFF 出来ることに等しい。つまり 1 日 20.2 時間の HEFL 照明点灯で栽培出来ることと同等である。



写真2-5-1-3 栽培棚を側面から見る

更なる電力削減策として、栽培日数の短縮で実現出来る。今回栽培のリーフレタス類では光量子量が $400 \mu \text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 程度までは、その光量子量に成長が比例するとの説が認められている。1 回目のフリルアイス栽培途中において、太陽光直射光が当たる窓側のフリルアイスが太陽光直射光が当たらない中央通路側のものに比較し成長が早く、また徒長が窓側ではほとんどなく、中央

通路側では徒長が確認できた。写真 2-5-1-3 は栽培棚側面から成長状況を見たものであるが窓側（写真左）が通路側（写真右）より成長が進んでいることがわかる。移植後 20 日経過の収穫状況の写真を示す。写真 2-5-1-4 に窓側のフリルアイス、写真 2-5-1-5 に通路側のフリルアイスを示すが、窓側の株は徒長が少ないことがわかる。これでフリルアイスが光量子量に比例して成長が加速で可能なことがわかる。また直射光がまったく当たらない北側の栽培棚では室外からの光量子量は最大でも $100 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 程度であり、成長が劣ることがわかる。写真 2-5-1-6 に北側窓側で栽培したフリルアイスを示す。



写真2-5-1-4 窓側のフリルアイス



写真2-5-1-5 通路側のフリルアイス



写真2-5-1-6 北側窓側でのフリルアイス

ハイブリッド型植物栽培ユニットに入る太陽光の光量子量から、どれくらいの栽培日数が削減可能できるか、ツジコーの栽培手順に従って検証した。結果、栽培日数の短縮で 15% の削減になることがわかった。先に述べた太陽光利用による HEFL 照明電力削減が 15.9% であったので、 $(100\% - 15\%) \times (100\% - 15.9\%) = 71.5\%$ となる。したがって削減率は 28.5% となり目標の 25% を達成できる。

2-5-1-3 設備投資額

日産 1 株当りの設備投資額を検討した。従来の閉鎖型植物工場の提案では、既存の建物を利用して、中に閉鎖型植物工場を造ることを前提にしていた。今回のハイブリッド型植物栽培ユニットでは外部建物から新規に製作するが、今回の実績を基に実験要素の装置設備を省力し、見積もりを行なった。

建物は全長 12m で幅 2m のコンテナ型建物とする。栽培棚は棚間高さを 500mm とし、太陽光の効率的利用を図る。全長 5m の 4 段棚を 2 台並べるレイアウトとする。HEFL 照明台数は 40 台で日産 44 株が栽培出来る。

1 箇所 20 棟くらいを大量建設することにより、総投資額は、430 万円となり 1 株あたり投資額は 9.8 万円となり目標金額を達成出来る。

2-5-1-4 機能性野菜栽培システム

ハイブリッド型植物栽培ユニットの栽培用照明として今回新たに、波長の構成が特殊な HEFL 管を採用した。

太陽光を受ける南側ガラスには緑色域カットシートを貼り、室内の熱源となる緑色波長の光線の侵入を抑え同時に機能性野菜栽培の生育に有効な波長を室内へ取り込むようにし

た。これで、機能性野菜を栽培できる環境を備えることが出来た。

2-5-2 ハイブリッド型植物栽培ユニットでの自動調光システムの実験と評価

ハイブリッド型植物栽培ユニットに設置された HEFL 照明に調光装置、センサー 2 系統（太陽光用、照明用）を取り付けた様子が写真 2-5-2-1 と写真 2-5-2-2 である。調光方式は 1 灯 1 灯 HEFL センサーと太陽光センサーがつけられており、そのセンサー値により調光をおこなってもいいのだが、センサー値のバラツキやセンサーが柱の影になったりガラス窓のそばに車が止まる場合も出てきたので、太陽光は南側と北側の面での最大値か平均値で調光するようにした。これにより HEFL ごとにバラバラな制御ではなく、面としての制御が出来るようになった。太陽光からの光量子量に応じて、制御装置から無線にて個別の HEFL 照明調光が出来ることが確認できた。



写真 2-5-2-1



写真 2-5-2-2

制御装置のオペレーション画面（図 2-5-2-1）は、ユーザーインターフェースであり且つ 24 台分のモニター、制御機能、

アルゴリズムがソフトウェアにて処理されている。また、無

線制御なので遠隔地に設置可能で自由度がある。さらに LAN に接続することで自宅、オフィスからの遠隔操作も可能である。



図 2-5-2-1

2-5-3 ハイブリッド型植物栽培ユニットの評価

太陽光併用のハイブリッド型植物栽培ユニットが完成し、閉鎖型植物工場と同等以上の性能を実現した。

消費電力量削減目標（25%）については、自動調光システムによる HEFL 照明の節電効果が 15.9%で、栽培日数削減による消費電力の削減は 15%である。したがって $(100\% - 15\%) \times (100\% - 15.9\%) = 71.5\%$ すなわち、消費電力の削減は 28.5%となり目標を達成出来た。

日産 1 株当りの投資額目標（1 株当たり 10 万以下）については、9 万 8 千円となり目標を達成出来た。

第3章 全体総括

自動調光システムを備えた HEFL 照明を取り入れ、太陽光を活用するハイブリッド型植物栽培ユニットを完成した。

開発過程では、従来行なっていた閉鎖型植物工場では得なかった太陽光の波長特性や太陽光を取り入れるための窓構造やその光学特性を研究できたので、今後の量産型太陽光併用の栽培方式や栽培装置の開発に生かしていける。特に今回は新たに開発した緑域の光波長を遮断するカットシートと市販の赤外域の光波長を遮熱するフィルムの2重構造の窓を開発し、ハイブリッド型植物栽培ユニットで問題になる太陽光からの熱(日射量)の75%を遮断出来た。

またこの緑域カットシートは従来市販品では入手できなかったもので、波長制御による機能性野菜栽培に効果あることが今回の研究でわかった。

太陽光の利用時に HEFL 照明を省電力化する自動調光システムの開発で大きな電力削減も可能となった。この自動調光システムは無線を利用してシステムを制御する技術が開発され、ハイブリッド型植物栽培ユニット外部から調光を可能とした。これは複数のハイブリッド型植物栽培ユニットを1台の遠隔主装置で管理できるので投資効果も高めることが出来るようになった。またこの無線による制御も今後他製品の開発への応用が期待できる。

ハイブリッド型植物栽培ユニットでの目標である電力削減25%については自動調光システムと栽培日数短縮により、HEFL 照明の28.5%消費電量削減が達成出来る。

ハイブリッド型植物栽培ユニットによる日産1株当りの初期投資額10万円以下に目標に対して、今回のハイブリッド型植物栽培ユニットの見積もり内容を検討し、実験目的の装置を除外し、構造を簡素化し9.8万円が達成出来る。

また機能性野菜を栽培できる特殊波長の新 HEFL 管も搭載でき今後の機能性野菜研究を推進出来る。

今後は、当装置でさらに種々な野菜の栽培研究とコスト削減実験を進め、早期にマーケティング調査や見学などにより具体的事業化を推進していく。