

野菜苗育苗における人工光補光実証プラントの開発

専門会員 向阪 信一 (松下電工株式会社) 非会員 洞口 公俊 (ヤンマー株式会社)
 専門会員 齋藤 直樹 (元松下電工株式会社) 非会員 上條 和彦 (松本ハイランド農業協同組合)
 非会員 黒越 治 (イワタニアグリグリーン株式会社) 正会員 村上 克介 (三重大学)

Development of Practical Plant Factory with Artificial Supplemental Lighting System for the Growth of Vegetable Seedlings

Fellow member **Shinichi Kosaka** (Matsushita Electric Works, Ltd.),

Non member **Kimitoshi Horaguchi** (Yanmar Co., Ltd.),

Fellow member **Naoki Saito** (Former Matsushita Electric Works, Ltd.),

Non member **Kazuhiko Kamijo** (Matsumoto High-Land Agricultural Co-operative Association),

Non member **Osamu Kurogoshi** (Iwatani Agri Green Co., Ltd.) and

Member **Katsusuke Murakami** (Mie University)

ABSTRACT

For stable mass production of vegetable seedlings with good quality, a commercial greenhouse nursery needs a supplemental lighting system that is not affected by light fluctuations under natural solar conditions. Therefore, a practical plant nursery covering a 12 × 24 m area, and using a supplemental lighting system, was developed for the growth of vegetable seedlings. The developed lighting system had 400-W mercury-free, high pressure sodium lamps with reflectors, which produced a red radiation to far-red radiation photon flux (R/FR PF) ratio of 1.1. This is similar to that of solar radiation. And over about 60 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ of PPFD was realized for stable and healthy growth of vegetable seedlings. By using a simulation model of horizontal distribution of PPFD on two cultivation beds (each bed area: 4.6 × 22.6 m) under 100 lamps, it was found that the system had high uniformity of lighting on the two beds. Observed value of illuminance and PPFD and uniformity also satisfied the planned specifications. By repeating a seedling growth experiment using various plants in this greenhouse, it is expected that the practical and effective use of this supplemental lighting system will be possible in rainy seasons or in the late winter period.

KEYWORDS : supplemental lighting, seedling growth, plant nursery, iso-PPFD simulation, R/RF PPFD ratio, high pressure sodium lamp

1. はじめに

農作業の効率化の一方法として、播種、育苗を生産農家から分離して専用施設で実施し、ひいては初期成育の充実、大規模経営、定植の機械化などを実現することが挙げられる。この目的で、高品質苗の大量安定供給を目的とした「育苗プラント」や「セル成型苗」の研究開発がすすめられており¹⁾²⁾、セル成型苗の生産は1989年の37百万本から1994年には12億51百万本に増加し、セル成型苗のうち「野菜のセル成型苗」の占める割合が88%になった³⁾。

一方、「育苗プラント」経営では、大規模育苗システムの確立に向けて、大規模顧客の確保とともに高品質苗の安定生産システムの構築が不可欠である。苗の成育環境条件のなかの支配的環境要因の一つである光放射（以下、光と記す）環境は季節や天候によってその変動が大きい⁴⁾。このため、自然光のみで通年、所要の光環境を確保することは困難であり、良質な苗を大量に安定供給する上で「人工光による補光システム」⁵⁾の採用が欠かせない。

野菜の安定生産の観点から小規模な補光設備を使用し取量と補光の関係性を求めた海外の実験の報告⁶⁾はあるが、農業協同組合

(JA) など苗生産を業務としている生産プラントにおいて、補光システムの導入を目的とした報告は見られない。今回、野菜苗の大規模育苗プラントにおいて、大阪府立大学圃場温室で行った育苗補光の基礎実験⁷⁾¹⁰⁾およびそれに用いたランプの開発¹¹⁾から得られた知見をもとに、補光システムの実用化を図るための実証プラントを設計開発したので報告する。

2. 育苗実証プラントの概要

野菜苗の生産事業を行っている JA 信濃朝日（現在、JA 松本ハイランド、長野県東筑摩郡朝日村）に建設された育苗プラントに補光実証設備を設置した。育苗プラントの概要は以下のとおりである¹²⁾。温室に設置された設備のシステムの概要を図1に、主要設備の機能などを表1に示す。

2.1 建築および付帯設備

補光システムおよび播種システムを除く内部設備はオランダ HAWE 社の技術導入を図った。付帯設備はオランダ方式を基本とし、さらに日本の気候に適應した栽培能力を上げるために国内で独自技術の開発を行った¹²⁾。

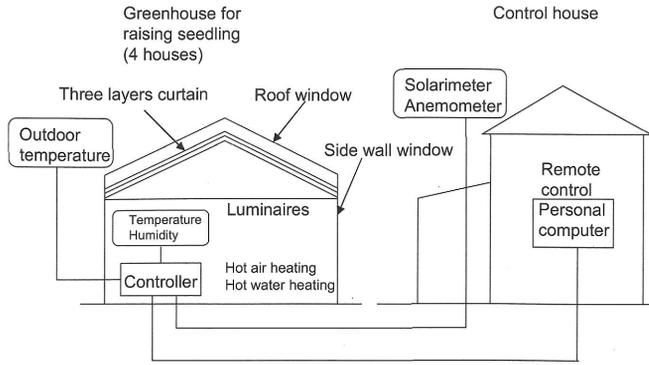


図1 温室に設置された設備の概念図
Fig.1 Installations in the greenhouse.

表1 温室の設備概要

Table1 Outline of the installations in the greenhouse.

Affiliation and address	Shinano Asahi Agricultural Co-operative Association 739-1 Onozawa Asahimura Higashichikuma-gun, Nagano pref.
Main structure	Glasshouse
Greenhouse dimension	Width:12.5m Length:69m(2houses),60m(1house),58m(1house)
Seedlings production method	Cell-raised plants of vegetables
Controlled factors in the greenhouse	Temperature, humidity
Temperature control method	Roof window control (opening and shutting) Side wall window (splashing or sliding door) Curtain(3 axis 3 layer control)
Heating method	Hot air and hot water heating
Experimental greenhouse dimension	12.5m × 45.0m Direction of the green house (length-wise): East-southeast and west-northwest Supplemental lighting area:1/2 Non-supplemental lighting area :1/2
Lamp operating method	24-hour time control

自然光および温度環境制御のために3層3軸カーテンと暖房設備および空気循環装置を設置した。上段は遮光を目的とした遮光率65%のアルミ材使用のシートが、中段はビニールシートが、下段は不織布が使用され、いずれも保温を目的としている。暖房は温湯暖房と温風暖房の2系統を併設し、温湯60%、温風40%の負荷で、外気温 -15°C において制御温度差 30deg. を確保している。温湯暖房は育苗床の下部にエロフィンパイプを配管し、温風はダクト配管を採用し、加温時以外は温室内の空気循環に使用できる。水と培養液の制御は、内部散水装置(移動式散水システム)、外部散水ロボットおよび液肥混合システムで構成した。

2.2 播種システム

播種作業関連装置は、独自に開発した「イワタニプラグシステム」¹²⁾を採用し、培土ミキサー、自動ポッティングマシーン、播

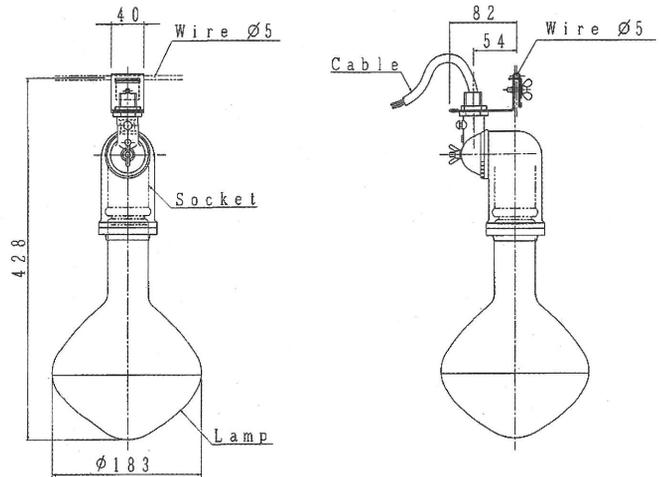


図2 試作 HID ランプを装着した器具 (左:正面図, 右:側面図)
Fig.2 Luminaire with a trial lamp (Left: front view, Right: side view).

種器、覆土ライン、散水ライン、プレハブ式シーダールームおよび苗抜き洗浄機で構成されている。本施設は国内技術と地域の自然条件に合う育苗方式を採用するため、培地用土を基本として試みた。

2.3 育苗システム

成育段階に応じて手前の出荷スペースへと自動送りされるムービング育苗ベンチを用いたセルトレー方式のセル成型野菜苗の生産を行う。育苗期間は1月下旬から10月上旬までの約10カ月間で、年間の苗生産量1000万本を目標とし、施設の点検・整備期間を入れて年間フル稼働を基本とした高効率野菜苗生産の向上を目指した。

3. 育苗補光システムの開発

3.1 補光システム設計条件

補光システムの設計に際して、その具備すべき条件として次の事項を考慮した。なお、光合成の評価は光合成有効放射 (PAR: photosynthetic active radiation) と呼ばれる $400\sim 700\text{nm}$ の波長域に含まれる光合成有効光子束 (PPF: photosynthetic photon flux) で行うことが定着しており、植物体実際に受光する光子の量は光合成有効光子照度 (PPFD: photosynthetic photon flux density) で示されるため、PPFDを設計時の単位とした¹³⁾。

- 育苗床でPPFDが $60\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 以上得られること⁹⁾。
- 育苗床上のPPFD均斉度(最小値/平均値)が苗成育のバラツキに関与するため、良好な均斉度を有すること。
- 補光用ランプの光質(分光分布)はPAR波長域である $400\sim 700\text{nm}$ に加えて、自然光同様に遠赤色光(Far Red: FR)($700\sim 800\text{nm}$)が付加されたものであること¹⁴⁾。
- 育苗補光プラントは荷重強度を十分に持たせにくいガラス温室構造であり、また、補光用照明器具(以下、器具と記す)による自然光の遮光を極力抑制するため、器具は小型軽量であること。
- 高い照明率(補光効率)がとれること。
- 補光時間、補光タイミング(日の出前補光、日没後補光など)などの点灯時間設定が任意にできること。

3.2 補光システムの設計概要

3.2.1 補光用ランプおよび器具の選定

設計条件(a), (d)を考慮し, できるだけ少ない器具で育苗床に所要のPPFDを得るため, 他のランプに比べ発光部の単位面積当りの光出力が大きく, ランプ当たり大きなPPFが容易に得られる高輝度放電ランプ(High Intensity Discharge Lamp: HIDランプ)を補光用光源として採用した。

器具として高天井セード(松下電工製, YK34190+YB16352: 約1760g)を使用した場合, セード径が381mmになる。これに対しランプ自体に反射鏡を設けたリフレクタ型HIDランプ(松下電器産業製, NHR180.L, NHR220.L, NHR270.L, NHR360.L, NHR660.L, NHR940.L)では, 180~360Wでランプ径が約180mm, 660~940Wで約280mmである。このため, 太陽光の遮光をより少なくできるリフレクタ型HIDランプを採用した。ランプワットの選定に際して, 既存のリフレクタ型高圧ナトリウムランプを用いて試験区で同じ照度が得られる灯数を求め, 照度予測を行った結果, 180W, 220W, 270W, 360Wのランプでは最少照度/最大照度の比率は0.68~0.75, 660Wと940Wでは0.19~0.36となり2種類のグループに分かれた。したがって, ランプ選定に際しては最大照度と最少照度の差が少ない180~360Wクラスのランプを試作することにした。また, 360Wクラスまで同一ランプ径でのランプ製作が可能であるため, 180Wクラスに比べ半分以下の所要台数で済み, 太陽光の遮光割合の軽減, 器具総重量の軽量化, さらに配線工事費用の削減が図れる360WクラスのHIDランプとした。照明器具は図2に示すランプとソケットで構成される構造にすることで器具重量は920gになり軽量化も図った。

さらに, 400~700nmのPAR波長域以外に700~800nmの強い放射パワーを持つ高演色性高圧ナトリウムランプで, 点灯中緩衝ガスの役割をする水銀の代わりに高圧のキセノンガスを封入し環境に配慮した, 植物用無水銀リフレクタ型高圧ナトリウムランプ⁸⁾を試作した(以下, 試作HIDランプと記す)。試作HIDランプの実測の消費電力は400Wであった。試作HIDランプおよび安定器の諸特性^{11), 14)-16)}を表2に, ランプの分光分布¹⁵⁾を図3に示す。

3.2.2 補光による光環境の設計

植物学の分野ではPPF, PPFD¹⁷⁾¹⁸⁾を, また照明分野では光束, 照度を測光基本としている。照明分野では光源および照明器具の光学測定技術や設計技術体系などが体系化されている。したがって, 光束, 照度を測光基本とした技術体系に基づいた照明設計による方法が有利で賢明である。同一分光分布を有する光環境に

表2 試作HIDランプの仕様

Table2 Specifications of a trial lamp.

〈Lamp〉		
Lamp wattage	(W)	400
Lamp voltage	(V)	110
Lamp current	(A)	4.8
Luminous flux	(lm)	14500
PPF	($\mu\text{mol s}^{-1}$)	350
R/FR PF ratio		1.1
Color temperature	(k)	2500
Rated life	(h)	12000
Diameter	(mm)	183
Length	(mm)	305
Base		E39
〈Ballast〉		
Current	(A)	4.9
Impedance	(Ω)	31.4

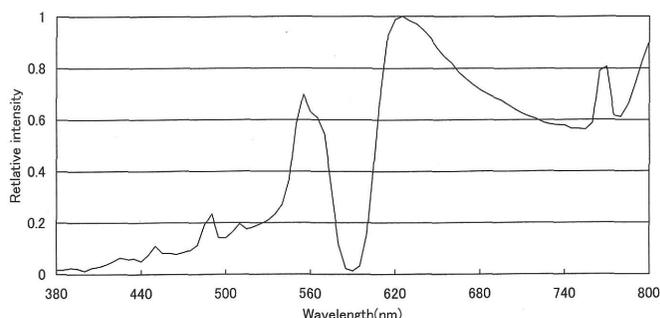


図3 試作HIDランプの分光分布

Fig.3 Spectral distribution of trial lamps.

あつては, 変換係数を用いることで, PPFを光束に, PPFDを照度に換算処理できる¹⁹⁾⁻²¹⁾。それぞれの変換係数をPPF光束換算係数, PPFD照度換算係数と本論文では記す。光環境設計に際しては, 換算係数を利用するとともにランプの配光曲線から照度率を求め所要ランプ本数を求める方法を採用した。

ランプの配光測定は, ランプを中心に照度受光部を鉛直面で半径5mの円弧状に5度間隔に配置した測定装置を使用し, ランプを360度水平回転させる方法²²⁾で, 松下電工(株)社内に設置された配光測定装置を用いて測定した。試作HIDランプを測定して得られた配光曲線を図4に示す。ZCM法²³⁾を用いてこの配光曲線から算出された照度率を表3に示す。ランプ光束は14500 lm, PPFは $350 \mu\text{mol s}^{-1}$ であるため¹⁵⁾, PPF光束換算係数は $41.43 \text{ lm} / \mu\text{mol s}^{-1}$ となる。また, 被照面の照度を算出するために, PPF光束換算係数($\text{lm} / \mu\text{mol s}^{-1}$)の分子と分母をそれぞれ m^2 で除すると, 分子は $\text{lx} (\text{lm m}^{-2})$ 分母は $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ となり, PPFD照度換算係数は $41.43 \text{ lx} / \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ になる。

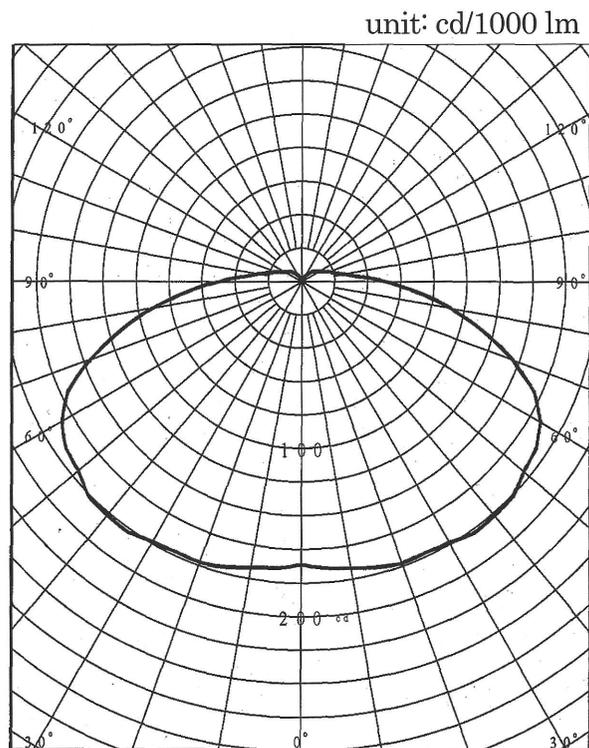


図4 試作HIDランプの配光曲線

Fig.4 Distribution curve of luminous intensity of trial lamps.

表3 試作 HID ランプの照明率
Table3 Utilization factors of a trial lamp.

Reflection	80%				70%				50%				30%				0%
	70	50	30	10	70	50	30	10	70	50	30	10	70	50	30	10	0%
Ceiling																	
Wall																	
Floor	10%				10%				10%				10%				0%
Room Index	Utilization Factor (X0.01) ZCM*																
0.6	49	36	27	21	47	35	27	21	44	33	25	20	41	31	24	19	17
0.8	59	46	37	30	56	44	36	30	52	42	34	29	49	40	33	28	25
1.0	65	53	44	37	63	51	43	36	58	48	41	35	54	46	39	34	30
1.25	71	60	51	44	69	58	50	43	64	55	48	42	60	52	46	41	37
1.5	76	65	57	50	73	63	55	49	68	60	53	47	64	56	51	46	42
2.0	82	73	65	59	79	71	64	58	74	67	61	56	69	63	58	54	49
2.5	86	78	71	65	83	76	69	64	78	72	66	62	73	68	64	59	55
3.0	89	82	75	70	86	80	74	69	81	76	71	66	76	72	68	64	59
4.0	93	87	81	77	90	85	80	75	85	80	76	73	80	77	73	70	65
5.0	95	90	85	81	92	88	84	80	88	84	80	77	83	80	77	74	69
7.0	98	94	90	87	95	92	89	85	91	88	85	82	86	84	81	79	74
10.0	100	97	95	92	98	95	93	90	93	91	89	87	89	87	85	83	78

(*) ZCM : Zonal Cavity Method²³⁾

3.2.3 補光による光環境の予測

設計条件(a)で設定した $60 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ を下回る部分が育苗床で生じないように、設計平均 PPFd の設定を $80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ として所要灯数を算出した。また、器具の取り付け位置は移動式灌水装置の障害にならないように設置するなどの物理的条件を考慮した。

(1) 所要灯数計算条件

照明学会技術基準²⁴⁾で既存ランプの保守率は設定されているが、今回採用した FR 付加の植物用無水銀高圧ナトリウムランプは試作ランプのため保守率が定められていない。そのため、試作 HID ランプの保守率として一般照明用の高圧ナトリウムランプの保守率と同一と仮定し、照明学会で決められた保守率の中から屋内設置・露出型・汚れ(普通)の値を採用した²⁴⁾。照明設計条件を次に示す。

- ・補光用ランプ：試作 HID ランプ
(配光曲線は図4に、照明率は表3に示す)
- ・ランプ設置高さ：地面より2.0m
(温室内の移動式灌水装置の障害にならない高さで決定)
- ・照射面高さ：地面より0.8m
(一般に育苗床として使用されている面の高さ)
- ・設計平均照度(設計平均 PPFd)：3300 lx ($80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
初期平均照度(初期平均 PPFd)^(注)：4000 lx ($96 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
- ・保守率：0.83
(注) 初期平均値は設計平均値を保守率(0.83)で除した値。

(2) 所要灯数計算

光束法²⁵⁾を用いて所要ランプ本数(N)を求めると次のようになる。

$$N = (E \cdot S) / (F \cdot U \cdot M) \dots\dots\dots(1)$$

ただし、E：照度(lx)、S：面積(m²)、F：光束(lm)、
U：照明率、M：保守率。

なお、照明率は次式で求められる室指数(K)²⁵⁾により表3の照明率表から算出される。

$$K = (L \cdot M) / \{H(L+W)\} \dots\dots\dots(2)$$

ただし、L：温室の長さ(m)、W：温室の幅(m)、

H：被照面からの器具高さ(m)。

(2)式に L=24.0m、W=12.0m、H=1.2m を代入し室指数6.7が算出された。ガラス温室での各面の反射率はガラス10~12%²⁶⁾、金属部分の反射率は亜鉛では30~40%²⁶⁾、アルミニウムでは60~80%²⁶⁾であるが、反射率の高い金属が反射面に占める割合が少ない。したがって、ガラス温室内部の面の反射率を天井0%、壁0%、床0%と低く仮定し照明率を表3から求めた。その結果、照明率(U)は0.73が算出された。

ここで、

$$E = 3300 \text{ lx}, S = 12.0\text{m} \times 24.0\text{m}, F = 14500 \text{ lm}, U = 0.73, M = 0.83$$

を(1)式に数値を代入すると、

$$N = (3300 \times 12.0 \times 24.0) / (14500 \times 0.83 \times 0.73) = 108.2 \text{ 灯}$$

となる。

(3) 照度分布予測

温室内の中央に通路が設置されることを想定し、間口方向1200mm 間隔、奥行方向2140mm 間隔で千鳥状に、器具をほぼ目標灯数に近い100灯配設した。本配置における照度予測を松下電工製照度分布シミュレーションシステム(Luminous Planner)を用いて行った。平均照度は3121 lx、平均 PPFd 換算では $75.3 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ となり、設計条件である3300 lx、 $80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ を若干下回ったが、育苗床が配設されると予想される育苗温室の壁面から内側0.7mの範囲(22.6m×10.6m)(以下、育苗範囲と記す)では、平均値が3340 lx ($80.6 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)となり設計値が確保できた。したがって、この予測計算結果に基づいた器具の配置施工を実施した。温室の照度分布の予測結果を図5に示す。図中の口印は器具位置を、破線は育苗範囲を示す。

3.3 補光による光環境の測定および結果

温室の間口方向の断面における器具の設置状況および育苗台などの位置を図6に示す。一部の器具については温室内の設備の関係から、予定された位置に配設できず位置をずらすとともに、ランプ中心軸を少し傾けた器具もあったが、ほぼ予定された場所で真下向きに器具を配設できた。

照度分布測定(ミノルタ製照度計 T-1) および PPFd 分布測定²⁷⁾(LI-COR 社製 LI-250 ライトメータ, LI190SA 光量子センサー:

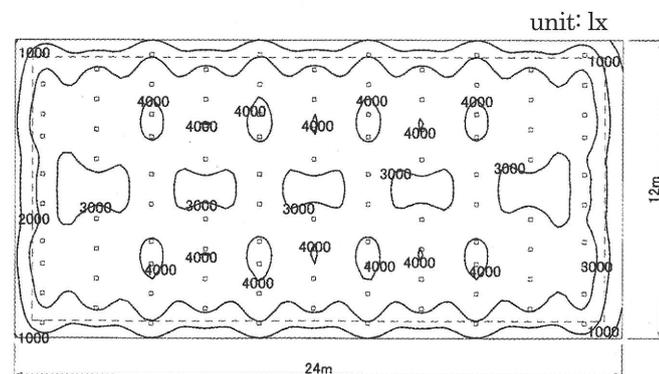


図5 シミュレーションによる水平面照度分布
Fig.5 Horizontal iso-illuminance curve on the surface of cultivation bed in a greenhouse by simulation.

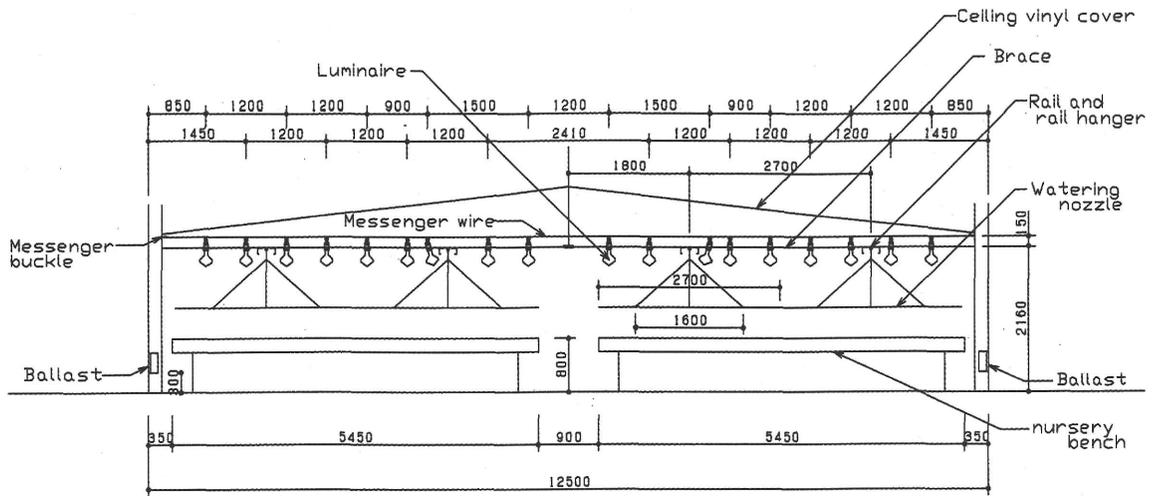


図6 温室内の器具設置の断面図
Fig.6 Layout of luminaries at the cross section of the greenhouse.

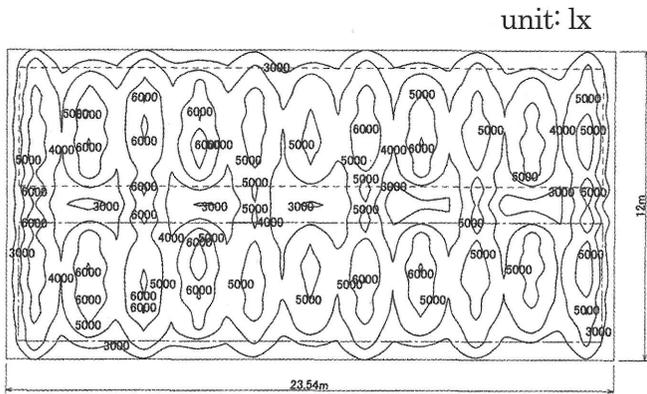


図7 実測照度分布図
Fig.7 Horizontal iso-illuminance curve on the surface of cultivation bed in a greenhouse by observation.

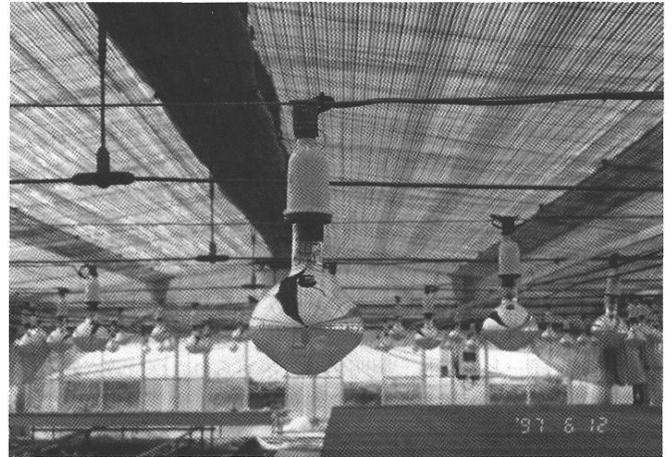


図9 器具の設置状況
Fig.9 Arrangement view of trial lamps in the greenhouse.

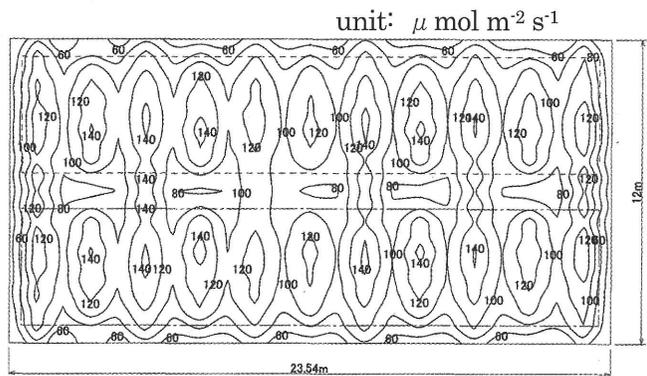


図8 実測 PPFD 分布図
Fig.8 Horizontal iso-PPFD curve on the surface of cultivation bed in a greenhouse by observation.

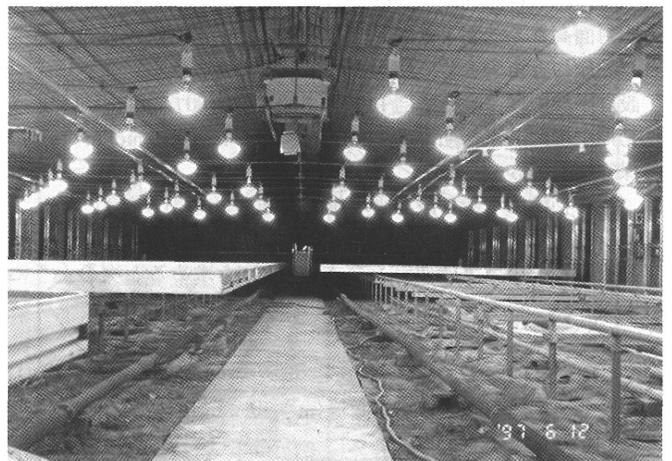


図10 夜間の点灯状況
Fig.10 Lighting view by trial lamps at night in the greenhouse.

測定レンジ $199\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、分解能 $0.01\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)を行った結果をそれぞれ図7および図8に示す。なお、図7および図8の破線、一点鎖線については(4.2項)で述べる。器具の設置状況および夜間の照明状態を図9および図10に示す。設計照度、設計PPFD、シミュレーションによる予測照度、予測PPFD、実測照度、実測PPFDをまとめたものを表4に示す。

4. 考察

4.1 実測照度ならびに実測 PPFD

表4に示すように育苗範囲における予測平均照度3340 lxを保守率0.83で除した予測初期平均照度4020 lxに対し実測平均照度は4558 lxとなり、育苗範囲で設計条件(a)を十分に満足させることが確認できた。予測初期平均照度に対して実測平均照度の方が13%高くなった。同様に、予測初期平均 PPFD $97.1 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ に対し実測平均 PPFD は $109 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ となり、設計値に対して実測値の方が12%高くなった。照度、PPFD いずれの実測値も設計値より高くなったが、その理由としてはガラスやアルミ柱などのガラス温室を構成する材料による反射光が寄与しているものと考えられる。

近接照明を行ったことにより、実測範囲 (23.54m × 12.0m) から逆算した照明率 $\{(\text{照度} \times \text{面積}) / (\text{ランプ光束} \times \text{ランプ本数})\}$ は0.82となり高い照明率が得られ、設計条件(e)を満足することができた。

4.2 均斉度

実際に設置された育苗床 (以下、設置育苗床と記す) は図6に示すように片側5.45m幅の育苗床2組で構成され、24m方向の中央部に90cm幅の通路が設けられた。設計条件(b)を満たす設置育苗床の範囲を屋内照明で推奨されている照度均斉度 (最小照度/平均照度) 0.6⁽²⁸⁾以上と仮定し有効育苗範囲とすると、中央通路より北北東側の設置育苗床では、図7および図8の破線の範囲が有効育苗範囲 (22.6m × 4.6m) となった。有効育苗範囲では実測平均照度4698 lx、実測最小照度3100 lx、実測平均 PPFD $111 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、実測最小 PPFD $74 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ となり、平均照度、平均 PPFD とも設計条件(a)を満たした。照度均斉度 (最小照度/平均

照度) は0.66、同 PPFD 均斉度 (最小 PPFD/平均 PPFD) は0.67になり、屋内照明で推奨されている照度均斉度以上が確保でき、一般照明の観点からは設計条件(b)が満たされていると考えられる。しかし、育苗にとって許容される均斉度は明確にされていないため、今後の研究課題である。表5は有効育苗範囲における平均値、最小値、均斉度などをまとめたものである。なお、設置育苗床は通路を挟んで対称に配設されており、南南西側の有効育苗範囲を図7、図8の一点鎖線で示す。

4.3 照度換算係数

表4に示す測定範囲全体の実測平均照度4219 lx、実測平均 PPFD $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ から算出される PPFD 照度換算係数は $42.19 \text{ lx} / \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ となり、照明設計時の換算係数 $41.43 \text{ lx} / \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ に対する実測値の比率は1.02となった。このことから、PPFDを照度に換算することにより照明分野で用いられる光束・照度・配光曲線・照明率などをベースとした照明設計手法を農業分野で活用することが可能であることが示唆された。

4.4 試作 HID ランプおよび器具

照明に使用されるランプは、白熱電球を除き視覚感度の低いFR波長域の分光放射がほとんど欠如している。一方、植物の育成には赤色光 (R) (600~700nm) と遠赤色光 (FR) (700~800nm) の R/FR 光子束 (PF: photon flux) 比が重要な要素となり、植物の葉面積、莖長、草丈などの形態形成に関与することが知られている。自然光 (CIE standard illuminant D65) は同 R/FR 比が1.08⁽²⁹⁾であり、自然光下での形態形成に合わせるよう、PAR放射にFR放射を付加することで試作 HID ランプの同 R/FR 比をランプ電圧制御により1.1⁽¹⁴⁾とし設計条件(c)を満足させることができた。

高天井セード (松下電工製、反射笠 (YK34190)、ランプホル

表4 補光試験区の実測照度および PPFD

Table4 Observed average illuminance and PPFD at supplemental lighting area.

Data classification		Illuminance (lx)	PPFD ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Remarks
Planned specification	Planned value	3300	80	Supplemental Lighting area (24.0m × 12.0m)
	Initial value*	4000	96	
Simulated value with 100 luminaires	Planned value	3340	80.6	Seedlings growth area (22.6m × 10.6m)
	Initial value*	4020	97.1	
Observed values		4219 (max.: 6670) (min.: 1304)	100 (max.: 152) (min.: 31)	Observed area (23.54m × 12.0m)
		4558 (max.: 6670) (min.: 2190)	109 (max.: 152) (min.: 68)	Seedlings growth area (22.6m × 10.6m)

(*) (Initial value) = (Planned value) / (maintenance factor 0.83)

表5 有効利用範囲における育苗床の実測照度および PPFD

Table5 Observed illuminance and PPFD at the effective area for seedling growth.

Data classification		Illuminance (lx)	PPFD ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Remarks
Planned value (initial value)*		4000	96	Planned condition (a)
Observed value (North-notheast side) (22.6m × 4.6m)	Average value	4698	111	This value satisfied planned condition (a)
	Maximum Value	6670	152	
	Minimum value	3100	74	
	Uniformity Ratio (Min./Ave.)	0.66	0.67	This value satisfied planned condition (b)

(*) (Initial value) = (Planned value) / (maintenance factor 0.83)

ダ (YB16352), 松下電器産業製, ランプ (NH360F)) を使用した場合の鉛直方向投影面積 1140cm^2 (直径 381mm) に対し試作 HID ランプでは 263cm^2 (ランプ径 183mm) となり, 投影面積を 77% 減少でき太陽光に対する器具の影の影響を抑制できた。また, 高天井セードの器具高さは約 47cm であるのに対し, 試作 HID ランプでは約 43cm になり, 高さを 3cm 低くすることができた。安定器を除き, 高天井セードの重量約 1760g に対して試作 HID ランプを使用した器具重量は約 920g となり, 所要器具台数が同じとすると全体で 84kg の器具の軽量化が実現できた。このように, 試作 HID ランプをソケットに装着した器具の採用で設計条件(d)を満足させた。24時間で1周期の点灯サイクルを有するタイマを使用することでランプを任意の時刻で点灯制御させ, 設計条件(f)を満足させる機能を持たせることができた。

5. まとめ

オランダ HAWE 社の技術導入をもとに日本の気候に合わせて独自に開発した換気・遮光・暖房・散水などの生育環境調節設備を持たせ, さらに自然光に近い R/FR PF 比を有する無水銀植物用 HID ランプを使用した補光設備を設置することで, 育苗実証プラントとしての機能・性能を向上させることができた。従来, 実験室で行っていた育苗補光試験が今回の実証プラントを使用することで, 育苗補光プラントの実用化に向けた検証が可能になった。特に冬期や梅雨期などの日照条件の悪い時期での高品質・安定生産・24時間点灯も視野に入れた補光方法や日の出前補光・日没後補光などの補光タイミングなどの実証実験が可能になった。今後は, 実験の積み重ねを行い, 全体システム構成の改善, 生産性コストの低減, 運用マニュアルの向上を図り, 育苗生産が産業として成立する実用プラントへの完成度を高めていくことが課題である。

本研究の一部は, 大阪府立大学生物資源開発センター共同研究「植物栽培施設における統合環境制御システムの開発に関する研究」として実施した。これらの実験を進めるに際し, ご支援・ご指導いただきました大阪府立大学元学長 相賀一郎博士, 同教授 清田信博士, 松下電工株式会社 元理事 森田富彦氏および論文作成を支援いただいた教育センター新金岡 宮地謙一博士に深謝します。

参考文献

- (1) 古在豊樹, 佐瀬勲紀, G. Giacomelli, KC Ting and W. Roberts : 苗生産システムの将来, 農業および園芸, 65-1, pp.97-103 (1990).
- (2) 塚田元尚 : 育苗システムとセルナエ, 農業および園芸, 65-1, pp.111-117 (1990).
- (3) 例えば, 小田雅行 : 苗生産技術, 施設園芸ハンドブック, (社)日本施設園芸協会編, 園芸情報センター, pp.267-268 (1998).
- (4) 日照時間の月別平年値, 理科年表, 国立天文台編, 丸善株式会社, pp.214-215 (2006).
- (5) J. F. Caminada, Th. Besselaar and D. L. Parker : Artificial lighting in horticulture, *Internat. Ligh. Rev.*, 34-4, pp.91-99 (1983).
- (6) G. Giacomelli, I. Gasgreen and H. Janes : Lettuce and tomato intercropping system with supplemental lighting, *Soill. Cult.*, 3-1, pp.39-50 (1987).
- (7) 成日慶, 村上克介, 洞口公俊, 向阪信一, 森田富彦, 清田信 : レタス苗生産システムにおける補光に関する実験的研究, 日本植物工場学会平成8年度大会学術講演要旨集, pp.21-22 (1996).
- (8) 洞口公俊, 成日慶, 村上克介, 向阪信一, 森田富彦, 清田信 : ブロッコリー育苗補光に関する実験研究, 日本植物工場学会平成9年度大会学術講演要旨集, pp.380-381 (1997).
- (9) K. Murakami and I. Sung : Comparison of three types of HID lamps for supplemental lighting on lettuce seedling plant production, *Applied Biological Science*, 2-1, pp.27-32 (1996).
- (10) 洞口公俊, 成日慶, 村上克介, 向阪信一, 森田富彦 : 育苗補光に関する実験研究, 第15回松下電器総合技術シンポジウム, p.200 (1997).
- (11) N. Saito, S. Kosaka, A. Okada, K. Nishioka, M. Toho, K. Murakami and K. Horaguchi : Mercury-free HPS lamp with high CRI operated on inductive ballast and its one application for plant growth, *J. Light & Vis. Env.* 25-1, pp.6-12 (2001).
- (12) 黒越治 : オランダ方式の種苗生産施設—長野県信濃朝日農協育苗センターの例, 第7回生物資源開発セミナー「種苗の工業的生産システムの現状と将来」, 大阪府立大学付属研究所生物資源開発センター, pp.36-40 (1994).
- (13) 例えば, 洞口公俊, 村上克介 : 光放射の評価と計測, 照明ハンドブック, 照明学会編, 9編2章4項, p.512 (2003).
- (14) 村上克介, 洞口公俊, 向阪信一, 成日慶, 斉藤直樹, 森田富彦, 清田信 : 育苗工場における HID ランプによる補光, 1997年度日本農業気象学会近畿支部大会講演要旨, pp.1-2 (1997).
- (15) 洞口公俊, 村上克介, 向阪信一, 斉藤直樹 : 野菜苗の育苗補光に関する研究, 第32回照学全大, p.235 (1999).
- (16) 洞口公俊, 村上克介, 山中泰彦, 大久保和明 : 分光放射計の植物栽培光環境への適用, 生物環境調節, 34-3, pp.196-197 (1996).
- (17) 例えば, 村上克介 : 光放射計測と評価法, 照明ハンドブック, 照明学会編, 9編1章, pp.498-500 (2003).
- (18) 例えば, 中川靖夫 : 光バイオインダストリーにおける光放射の評価法, 光バイオインダストリー, 照明学会編, pp.176-179 (1992).
- (19) 例えば, 相賀一郎 : 光バイオインダストリーのための光放射源, 光バイオインダストリー, (社)照明学会編, pp.138-139 (1992).
- (20) 例えば, 村上克介 : 光の測定法, アグリビジネス, 10-4, pp.73-81 (1995).
- (21) 例えば, 村上克介 : 洞口公俊 : フォトンによる光放射環境の測定と評価, 日本照明委員会誌, 12-4, pp.15-19 (1995).
- (22) 例えば, 石野正敏, 木滑寛治, 杉山春夫 : 配光測定, 光の計測マニュアル, (社)照明学会編, 日本理工出版会, pp.187-193 (2003).
- (23) B. F. Jones, C. J. Allen, I. Goodbar, F. Clark, J. R. Jones, G. Gilleard, R. C. LeVere and J. J. Neidhart : Zonal-cavity method of calculating and using coefficient of utilization, *J. Illum. Engng. Soc.*, 59 (5), pp.309-328 (1964).
- (24) 照明設計の保守率と保守計画改正版 (技術指針 JIEG-001 (1987)), (社)照明学会, pp.1-15 (1987).
- (25) 例えば, 飯塚昌之 : 光束法による平均照度計算, 照明ハン

- ドブック(第2版), 照明学会編, オーム社, pp.80-81 (2003).
- (26) 例えば, 松浦邦男: 建築照明, 共立出版株式会社, p.145 (1972).
- (27) 村上克介: 苗生産における補光技術, 農業電化, 52-10, pp.18-22 (1999).
- (28) オフィス照明設計技術指針 (JIEG-008 (2002)), (社)照明学会, p.7 (2002).
- (29) K. Murakami, I. Aiga, K. Horaguchi and M. Morita: Red/far-red photon flux ratio used as an index number for morphological control of plant growth under artificial lighting, Acta Horticulture, 418, pp.135-140 (1997).

(受付日2006年1月30日 / 採録日2006年6月2日)



向阪 信一 (専門会員)

松下電工株式会社中央照明エンジニアリング総合部
〒571-8686 大阪府門真市大字門真1048
1970年3月大阪市立大学工学部電気工学科卒業。同年松下電工株式会社に入社。屋内照明設計技術の開発を経て, 現在, 植物育成・農業害虫防除・水産養殖などへの光放射応用の研究開発に従事。技術士(電気・電子部門)。日本植物工場学会会員。



洞口 公俊 (非会員)

ヤンマー株式会社技術顧問
〒530-0015 大阪市北区中崎西2-4-12
梅田センタービル27F
1941年生まれ。同志社大学工学部電気工学科卒業。松下電器産業(株)照明研究所を経て, 現在, ヤンマー(株)技術顧問。生態工学会理事, 日本植物工場学会理事, バイオサイエンス研究会副会長, 大阪府立大学生物資源開発センター共同研究員。学術博士。



齋藤 直樹 (専門会員)

齋藤光源コンサルティング
〒567-0009 大阪府茨木市山手台6-19-19
1969年京都大学工学部電気工学第二学科卒業。松下電子工業(株), 松下電工(株)にて, 水銀ランプ, 高圧ナトリウムランプ, メタルハライドランプなどの研究・開発・商品化に従事。現在, HIDランプのコンサルティングに従事。



上條 和彦 (非会員)

松本ハイランド農業協同組合朝日支所
〒390-1104 長野県東筑摩郡朝日村古見1503-1
長野県農業技術大学校卒業。朝日村農業協同組合, 信濃朝日農業協同組合において営農指導員。種苗生産, 堆肥, 有機物供給など農業生産販売および指導関係に従事。現在, 松本ハイランド農業協同組合朝日支所営農生活課長, 兼営農センター長。



黒越 治 (非会員)

イワタニアグリグリーン株式会社プロジェクト営業部
〒541-0052 大阪市中央区安土町3丁目2番9号
1948年生まれ。同志社大学法学部卒業。園芸施設, 設備の開発, 輸入, 営業に従事。現在, プロジェクト営業部長, 日本植物工場学会会員。



村上 克介 (正会員)

三重大学生物資源学部
〒514-8507 三重県津市栗真町屋町1577
1983年東京大学農学部卒業。兵庫県庁勤務。1992年大阪府立大学大学院博士課程修了。学術博士。同大学助手, 講師, 助教授を経て, 現在, 三重大学教授(生物資源学部)。専門分野, 生物環境制御学。