光植物工場経済化のための新しい照明方法

水島宜彦

〒434-0012 静岡県浜北市中瀬 7136-50

Theory and Experiments of New Illumination Techniques for the Efficient Plant Factory Management

Yoshihiko MIZUSHIMA

7136-50 Nakaze, Hamakita 434-0012, Japan

Abstract

By a proposed theory of an incomplete integrating sphere, illuminance is calculated for efficient photon flux utilization. A practical theoretical model is proposed to estimate the degree of illuminance enhancement.

New high-pressure sodium lamps of high color-rendering properties are equipped within the integrating sphere, which yield a considerable gain in the plant factory management. Infrared wavelength component is attributed to this improvement, indicating that the PPF concept is not sufficient for describing the real growth condition, as well as the power efficiency.

By extending the result of utilizing the high color-rendering lamp and the integrating sphere, a considerable improvement in the energy economics of the plant factory is attained than in the author's previous reports. Also to apply to the energy system with a solar power generator, possibility of a self-sustained power system is clearly suggested.

Keywords : plant factory, maximum profit, lettuce, illumination optimization, lamp efficiency, infrared, integrating sphere, solar power

緒 言

光植物工場の経済化においては、照明の手段とそのコストとが最大の問題である^{1,2)}。著者は前の報告³⁾で、従来のモデル植物工場における照明手法を最適化することによる経済化を評価したが、これは同時に従来の高圧ナトリウムランプの限界をも示したものとなった。所定の照度が得られるようにランプを適当に天井から吊すような従来の手法だけでは大きな改善を得られないことを、その報告で示した。

そこで、さらに進んだ解決策として、照明方法やランプの光質などに新規な改善を加える必要がある。本論文では、光植物工場の経済化の目的に絞って、照明手段の

改善について詳細な検討を行う。

通常の反射笠だけで植物を照らすとき、天井や壁の方向に光が逃げても、その反射率を高くしておけば光は必ず戻るので、最後には有効になっている筈、と考えるのは誤りである。その理由は、天井は遠くて照度が低いので、そこからの反射光量も少なく、ほとんど役に立たない。

植物工場に適する光照射効率化の手段として、積分球による照度の増強方法が考えられる。光をできるだけ有効に使うために、植物を植栽したパネルの周囲を反射材で囲うことが従来も行われてきたが、この場合に実用できる照度計算式は存在しなかった。これに関して見易い理論を構築する必要がある。

また光質の改善に関しては、従来使用されている低演色性の高圧ナトリウムランプのみでなく、高演色性のランプを再検討する必要があるだろう。前報告³⁾で言及し

1999年1月13日受付

1999年3月29日受理

たように、演色性改善ランプは光質の効果について実地に再検討する価値がある。

また以上の改善による経済化達成が可能ならば、太陽電池と組み合わせて自立型エネルギーシステムとなりうる植物工場の可能性についても前報の再検討が必要となるだろう。

積分球の近似理論

相互反射系について、経験的な室内形態係数を用いて数値を概算することが行われているが、室内照明用にモデルが固定されパラメータ自由度が無いので直観的でない。本質を理解するには、下記のように、積分球の式を基準にする方がよい。

完全積分球の理論は、その内部の照度に関して正確な評価を与えるので、これを穴のある場合に近似的に拡張する。簡単のためにその形状を球と仮定する。これによって、いわゆる固有照度係数(拡散光のやり取りにおける立体角と距離との関係を積分して得られる比例係数)が内面積(S)の逆数という簡単な定数となる利点がある。これは等照度球面の定理[球内面の一部が完全拡散面であるとき、(輝度は一様でなくとも良い)ある点の照度はその位置に無関係となる]としても表現できる。

ランプからの直接入射光束を F 、それにより直接照射された部分の(積分球の無いときの)照度を E_0 、積分球の内面積を S 、その反射率を R として、完全積分球の内部の照度(E)は次のように書ける。単位は、たとえば $1\text{m}^2/\text{m}^2 = 1\text{x}$ である。これらの詳細は文献⁴⁾などを参照。

$$E = E_0 + \frac{FR}{S(1-R)} \quad (1)$$

第1項は直接照射によるもので、第2項は積分球内部において光が再利用されることを示す。この効果は積分球が小さいとき(S 小)に有利であるから、小さく作べきである。

われわれの考察対象は完全な積分球ではなく、多少の穴があって光の損失が発生する場合であり、その不完全な積分球の効果を評価するのが、本節の目的である。

内壁が不完全で穴が多いと、上記の様な積分球の条件が成立しないので、式の近似度が悪くなる。しかし、拡散戻り光量も減り、誤差の割合も相対的に減るので、この近似で我慢しよう。

積分球の壁に穴があって、光が外部(天井など)に洩れる場合を考える。天井は遠いので、そこの照度は低下する。再び積分球内部に戻るときに穴を見込む立体角も小

さい。計算すると、不完全積分球の穴からいったん外部に出た光が再度内部の照度に寄与する割合はきわめて小さくなる。つまり、穴は反射率ゼロの部分と見なせる。そこで、積分球の有効面積率(α)を定義しよう。完全積分球では $\alpha=1$ で、穴があるときは $\alpha<1$ となる。

また、植物は有効波長の放射をかなり吸収するので、その波長に対しては植物自体も穴である。このような「植物による等価的な穴」によって有効面積は更に低下して、この穴の面積割合が α を低下させる。また植物の成長に伴い、直接光照射面積が植物で占領されてくると白色パネル部分が少なくなり、拡散反射光に回る割合が少なくなってくる。この割合は、植物占有面積に対するランプからの直接光照射面積(S')比で決まり、これを β と定義する。

この仮定のもとで、次の式が導かれる。(1)式の S は相互反射に関わる固有照度係数であるから、等価的な球を仮定する限り定数である。そして相互反射は不完全な穴の部分では起らないので、拡散反射光束は S ではなく、 αS の範囲でのみ積分される。また拡散反射に有効な反射光束は植物占有面積以外から発生するので、 $F(1-\beta)$ となる。こうして

$$E = E_0 + \frac{F(1-\beta)R}{S(1-\alpha R)} = \frac{F}{S'} \left\{ 1 + \frac{S'(1-\beta)R}{S(1-\alpha R)} \right\} \quad (2)$$

右辺の中括弧内が不完全積分球での照度増倍率である。

直接照明が植物にだけ丁度当たるようにすると、光束を全部利用はするが、一方で $\beta=1$ なので積分球効果を失う。逆に、もし植物以外の壁などを直接照射し、その分の光束を拡散反射に回すなら、壁面の反射率が高い場合、積分球効果により再利用されるので、かえって得になることがある。極端な場合、積分球の天井や壁のみを直接照射し、その拡散反射光のみを植物に与えるとき、その方が直接照射より照度が増す条件は

$$\frac{S'R}{S(1-R)} \geq 1 \quad (3)$$

つまり αR 積を大きくすればよく、植物の成長初期には α が大きければ達成できる。これから判るように、積分球では直接照射に限らず光の当て方に自由度がある。特に、従来のように上面からの直接照射のみでなく、横からも照射されるので、閉空間構造が有利な場合があろう。いわゆるデルタ構造¹⁾においてもこのような利得を若干期待できよう。

典型的な場合について、反射率を変数としての照度増倍率を図1に示した。後で述べるように、実際に作ってみると α は定植直後(成長初期)に 0.9、収穫直前(成長

図1 不完全積分球の内部照度増倍率計算値

Fig.1 Theoretical illuminance enhancement within the incomplete integrating sphere. Parameters are the effective area ratio (α) and the occupation ratio (β).

後期)には β 効果によって0.6程度になる。また β は定植直後に0.1、後期に0.8程度である。 S'/S は0.4程度である。発泡ポリスチロールの反射率は赤色光に対して85%程度以上なので、増倍率は図1から初期に1.7、後期に1.1となる。この数字例を以下で実験と比較して検討する。

実験と結果

1. 積分球の内部照度の実験

積分球については S の小さいことが大切だが、実用性や操作性を考慮すると、ある程度の大きさも必要だし、妥協できる規模として次のようにした。

発泡ポリスチロール板で、栽培パネルを底面として、その上方空間を包囲する構造で、1.8m×0.9mの平面積を単位とし、高さ0.6mの箱(球ではない)とした。これはトンネル構造のモデルである。その上面(天井)には高圧ナトリウムランプの反射笠が開口している。あとで述べるように、ランプの近接によるヤケの現象は起らないため、もっとランプを近づけ(低める)ても良いが、作業性が悪くなるので、この高さに止めた。

通風が必要なので、諸所に隙間を設け、短辺の壁の一面にファンを取り付けた。穴があると効果は減殺されるが、通風のために若干はやむをえない。

この場合のランプの数は実験の関係で、上記の面積単位あたり2個としたが、積分球効果のために、内部の照度均一性は良好である。同じ光質のときなら積分球による照度増倍率の測定は意味があるので、シリコン受光素

表1 積分球による照度と成長率との増倍効果
データ欄の左列はシリコン光電ダイオード電流比、右列は成長率比

Table 1 Effect of integrating sphere on luminosity and the growth rate enhancement

	光電流比	成長率比
従来型ランプ	約1.25	1.28
高演色性ランプ	約1.25	1.20
中演色性ランプ	約1.25	1.29

子出力電流の比を取って増倍率とした。

積分球内部照度増倍率の測定は、栽培パネル上のそれぞれの位置で、積分球のある時と、そうでない反射笠だけの状態とでの、光電流比を取った。その結果を表1に示す。増倍率は、植物が無いときにランプ直下では1.3倍で、それから離れるに従って高く、周辺で2倍であった。パネル上全面積について平均を計算すると1.6倍程度である。植物のあるときには、やや劣り、平均で1.1倍程度であった。理論とほぼ一致している。成長全期間で平均すれば、終期に重点が置かれるので、ほぼ1.25程度と考える事ができる。

2. 積分球による栽培実験

栽培条件はモデル植物工場とほぼ同じである。栽培植物はサラダ菜(岡山サラダ菜)である。気温は21ないし23°C、湿度は55から70%、水温は21ないし22°C、炭酸ガス濃度は800ppm、ECは1.6から1.8、pHは6から7に保った。養液組成は大塚A処方(園試処方)、また日長は標準12時間であるが、後で述べるように日照時間短縮実験も行った。

栽培実験は、それぞれ上記モデル工場類似の照明条件(すなわち積分球を使用しない低演色性ランプ)での同時栽培を基準にして比較する。このとき照度ないし日照時間のみ相互に異なるので、中間に仕切を設けて光を遮断し、他の条件(気温、湿度、炭酸ガス濃度、養液の濃度組成など)は全く共通の環境で同時に並べて栽培し、その成長率の比を採り、規格化して示す。こうするのは、たとえば気温が少し異なると成長率絶対値が若干ずれるが、規格化した比は変わらないからである。成長率の決定方法については文献⁵⁾参照。

表1は積分球効果を示すもので、各欄の左側は照度増倍率を、右側は成長率増倍率を示す。両者はほぼ一致している。このように、演色性に関わらず、それぞれ照度と成長率とがほぼ比例関係にあるのは、照度飽和点以上で運転していないからである。

結論として、この積分球では、基準の場合に比して25%程度の増倍が可能である。

3. 高演色性および中演色性ランプによる栽培実験

高演色性ランプとは、ナトリウム蒸気圧を高めて演色性を改善したものである⁹⁾。スペクトルの特徴は、400 から 500 nm の青色部と 600 から 700 nm の赤色部とが 500 から 600 nm の中央部分に比して従来型ランプに比べそれぞれ 3 倍、4 倍に増強されている。さらに 700 nm 以上の赤外部分が大量に付加されている。ただし、ルーメン効率および公称 PPFD は半分程度に低下している。

また中演色性ランプは、青色部と赤色部とが、中間の緑色部に対して、低演色性ランプのそれぞれ 2 倍弱に増強され、赤外部もそれ以上に多い。総じて高演色性と低演色性との中間に位置する。

光質の異なるランプでの栽培効果については、波長が違うので、照度計で測定した数字や PPFD に換算した数字での単純比較では誤ることがある。前報告の計算では取りあえずそうしたが、やはり実験で確かめる必要がある。それには、前節に示したような比例関係を利用して、実際に栽培した結果の成長率で比較すれば良い。

前節同様に、低演色性ランプ(通常の反射灯だけで、積分球なし。ただし積分球と同じランプ高さとする。)を基準として規格化する。新ランプのほうは積分球をつけて比較栽培実験を数回繰り返して、両者での成長速度が同程度となるような比較組み合わせを探して、各ランプを選択した。結果は、基準を従来型の公称 270 W のランプとしたときに、積分球付きの高演色性ランプでは 150 W のもの、また中演色性ランプでは 220 W のものが対応した。以下はこれらについての比較である。

それぞれのランプ系の全消費電力を実測すると、(安定化トランスを含めた外部からの全入力パワーなので、ランプの公称値だけでは決まらない。この場合は双方とも高力率のリアクタンスを使った。)低演色性と高演色性との場合、それぞれ 1 灯あたり 300 W と 180 W となり、ほぼランプの公称消費電力に比例するので、以下ではランプ公称電力を基準とする。

新しいランプの光質の効果について、実際の成長率や電力コストなど、その他の効果も改めて確認する必要がある。まず日照時との関係を調べた。従来はすべて日照時間を 12 時間に統一していたが、定植後についてこれを 10 時間、8 時間などと変化してみた。苗の栽培条件は従来どおり低演色性ランプで日照 12 時間と共通で、それを分けて定植する。

この結果を表 2 に示す。消費電力との比率を考慮すると一定値が得られることは、日照時間と成長率とがほぼ比例していることを示す。従って、以下のような消費電

表 2 積分球付きでの日照時間による成長率および成長率/電力比(基準はモデル工場での低演色性ランプ)

Table 2 Effect of the illumination time length on the growth rate and its cost quality in relation to the reference lamp

日照時間(h)	中演色性ランプ		高演色性ランプ	
	成長率比	成長率/ 電力比	成長率比	成長率/ 電力比
12	1.29	1.58	1.20	2.16
11			1.0	1.96
10			0.95	2.0
8	0.85	1.56	0.75	2.0
6	0.67	1.65		

表 3 積分球が無いときの成長率比

Table 3 Normalized growth ratio of the new lamps, for demonstrating the infrared effect

	有効放射 パワー比	成長率比	成長率/ 有効放射 パワー比	R/FR 比の 逆数
高演色/ 低演色	0.372	1.20	3.23	2.42
中演色/ 低演色	0.721	1.29	1.79	1.21

力量を基準にした経済計算が成立する。

また、赤外光量効果の数値的検討を行った。比較基準とした低演色性ランプは赤外をほとんど含まないことを利用して、これに対して規格化した値で考える。従来云われている有効放射比[%]⁹⁾から計算した有効放射電力[w]と、これで割り付けた成長増倍率とを表 3 に示す。この相対比が公称 R/FR⁹⁾の逆数の相対比に比例している。従って、増倍効果と赤外光量とは相関がある。

これらの実験により、高演色性および中演色性ランプの PPFD が著しく悪いにも関わらず、成長率は逆に高いことが確認された。

また、定植時のショックで植え痛みがあることが知られているが²⁾、これを緩和するために、定植後の初日のみ照明を休止してみたところ、期待に反して成長率や植え痛み日数には明瞭な変化が見られなかった。このことは、定植直後はショックにより成長が停止していることの証明であり、従ってまたその分だけ照明電力を省略できることを示す。

考 察

1. 積分球の効果

積分球内部の照度は、成長と共に β が変わるので減

少してゆく筈だが、本論文の精度では検出できなかった。これには、成長と共に草丈が伸びてランプに近づくので、実質照度は成長末期において(約2割程度)増し、結果を補っていることもあるようだ。

生長期間中の照度増倍率を決めるに際して、パネルの全面を植物が覆ったときに収穫時期だからといって成長最終期の照度だけで全期間を代表させることもできないから、成長末期に重点を置いた平均的照度を仮定することになる。この値は1.25程度と推定したが、表1によれば、ほぼ実測結果と一致と見て良い。したがって成長率比も照度比とほぼ比例しているので、本論文で展開した理論は近似的に実用可能である。

実際、積分球の価値は全体照度の増加と同時に、内部照度の均一化を実現し実用可能としたことにある。従来は、なるべく広い面積での照度を均一にしようとする、光源を離す(高くする)しかなく、それは照度低下を招くので、大きなランプを必要としたが、積分球を使うとランプを近づけられるので、照射効率が良い。小型のランプでは数が増すので設備費が増えるが、償却の占める割合は電力費よりずっと少ないので、結果として費用が減り、経済化に大きな貢献をするのである。よく言われるヤケの現象も、ランプが小型になるので避けられる。

上記比較実験での基準としたような、積分球なしでランプを低く吊るす場合には照度ムラが大きくなるので、パネル上の株の重量にバラツキが出る。そこで重量平均値を取って計算に使った。こういう欠点があるので、従来のモデル工場そのままの直接比較は難しいが、もし品質均一性を無視すれば、ランプを低くしたときの電力費節約分は約5割と見積もられる。以下では、取りあえずその不確定係数を省略する。この基準がモデル工場の場合と完全等価とすれば前報告³⁾と比較ができるからである。積分球を使用すれば不均一は回避でき、実用性は充分で経済評価には問題ない。但しこのことから、以下の利潤の数字は極めて控えめのものとなっている。

2. 高演色性および中演色性ランプの光質と成長率

表2、表3では、公称のPPFD値とは違って、演色性改良型ランプによる成長率が優れていることが示されている。前の報告³⁾で、高演色性の高圧ナトリウムランプでは、公称PPFDを信用する限り不利であることを示したが、実験結果はこれに反した。したがって光質を変えた場合の実験結果には、新しい解釈が必要である。

これらの理由は、前報告で注意したように、高演色性ランプなどでは波長700nm以上の赤外光の成分が著しく多い⁶⁾ことに求めるべきだろう。植物によっては形態形成反応が赤外光で阻害されるということもいわれるが、

成長促進効果も報告されている⁷⁾。植物は赤外光を吸収せず、反射または透過のみである⁸⁾ので、 α は大きく β は小さく、赤外光に対しては特に積分球効果が著しい。

赤外光は光合成に直接利用されなくても、草丈を伸長させる作用がある^{8,9,10)}。植物群落内部、キャノピー内部においても、赤外線が多くなって側面からの照射も増し、このような効果が期待できる。これによって光を受けやすくなり、葉の有効な受光面積が増加するだろう。事実、高演色性ランプ照射区では葉が横に開いて展開し、葉面積も大きくなるなど、従来型ランプでの結球する傾向とは形態が異なってくる。

しかし欠点もある。育苗時から高演色性などの赤外過剰のランプを使用すると、臺(トウ)立ちが強くて結球しにくい傾向が出やすいなど好ましくない結果も現われる。当然こういうことも、作物によって異なるだろう。たとえば、結球レタスでは臺立ちは全く起こらない。

有効放射ないしPPFDの概念は、直接の光合成反応に関係するかも知れないが、実際の成長状況はまた別であって、赤外光の存在によって成長が補助的に活性化されるようだ。経済効果の計算には赤外光の効果を含めた成長理論を用いるべきだが、この効果を解析的に扱うことは困難である。

ひとつの試みとして、表3では各ランプの公称有効放射パワー(低演色性ランプとの相対比で示す)あたりの成長増倍率が、赤外光量(R/FR 比の逆数相対比)に比例することを指摘した。理由は別として、実質的に赤外光が成長に効いていることが示される。

以下の経済評価に用いる諸係数としては、実験値との比較によって実効的なPPFDに補正して使う。こうして、実効PPFD値(もちろん、本来のフォトン密度の意味を失って、見かけの係数に過ぎない)は、積分球による増強効果を含めて、もとの公称PPFDに比べ、かなり大きくなる。さらに電力消費が少ないので、電力あたりの生産性すなわち実効量子効率も良くなる。

3. 演色性の異なるランプでの植物工場経済評価

積分球と演色性改良型ランプとを組み合わせると、良い成績を得られることが判った。すなわち積分球では照度を増強し、かつ赤外線効果を利用でき、しかも消費電力が少ないという3つの利点を発揮できる。その結果経済化の可能性があるので、改めて前報告³⁾の(5)式を使って、光植物工場の経営収支を計算する。

これに従い、経済効果を算出するための各係数を再計算した結果が表4である。それぞれのランプの大きさが異なり、また積分球に装置して得られた実験値であるので、前報告表2³⁾における計算値とはランプに関する数

表 4 積分球による各種ランプの特性指数

Table 4 Properties and the coefficients of the measured three lamps with integrating sphere

	低 演 色	中 演 色	高 演 色	単 位
ランプ電力	270	220	150	W
公称光束	33.5	20	7.8	10^3 lm
育成放射効率	28.7	25.4	19.2	%
成長率電力相対比	1	1.58	2.16	低演色性を1とする(表2)
ランプセット価格	3.63	3.67	3.36	10^4 円
z	6.0	5.51	6.51	10^6 円
旧 k	40.7	42.3	32.6	$10^{-6} \mu\text{mol s}^{-1}\text{m}^{-2}/\text{円}$
実効 k	50.9	57.2	45.0	同 上
電力費用	485	395	269	10^4 円/年
旧 η	45.8	43.9	37.1	$10^{-6} \mu\text{mol s}^{-1}\text{m}^{-2}$ 年/円
実効 η	63.0	77.9	117.1	同 上
非電力可変費用	450	450	450	10^4 円/年
旧 f	54.2	52.0	47.1	$10^{-6} \mu\text{mol s}^{-1}\text{m}^{-2}$ 年/円
実効 f	67.8	69.9	65.0	同 上

字が異なる。新しく変更した係数については、前報告での計算値を旧、新しく補正した値を実効と記載する。その他は前報告と比較できるように、もとの数字を使う。また公称育成放射効率⁹⁾などの数字も参考として添えた。

量子効率(η)とは、実効 PPFD に対する照明電力コスト比率であり、照明設備費効率(k)とは、実効 PPFD に対する照明設備費の比率である。また非電力可変費用の効率(f)とは、実効 PPFD に対する電力コスト以外の、生産量に比例する(非電力)可変費用である。詳細な説明と定義は前報告参照。基準値は前報告での低演色性ランプを積分球なしで使うモデル植物工場の場合であるが、今回は低演色性ランプも積分球で使用することを考え、積分球増倍係数を掛ける。その他のランプについては、それぞれ低演色性ランプを用いた基準条件と比較した毎回の実験から、その成長率比を求め、補正係数とする。

日照時間を短くすると、総費用は少なくなるが、同時に成長率すなわち回転率も下がるので経済的には意味が無く、むしろ、このときには電力以外の経費の占める割合が大きくなって、総合経済化の効果が薄れる。以下の計算では従来どおり 12 時間とする。また定植直後の照明を省くことは有効である。植え痛みは変わらなくとも、たとえば 1 日/11 日相当分の照明電力減少の効果を期待できるので、今回の電力費用にはこれを考慮した。

高演色性および中演色性ランプに積分球を使用したモデル植物工場の利潤の計算結果を図 2 に示す。変数は照明投資額(z)であるが、判り易いように、前同様に k に比例する照度(L)で表示する。勿論これは真の照度ではなく、前報告と比較するために、従来の PPFD ならば、という意味である。出荷価格は市場競争力のある 85 円/株とした。

図 2 積分球と高演色性ランプなどを使用した場合のモデル植物工場の利潤

Fig. 2 Estimated profit of the modified plant factory, using the new parameters taken from the present experiment.

図 2 の利潤計算では、演色性による改善度の大きいことが示された。演色性改良ランプによって、出荷価格 85 円でさえも充分な利潤を得られる。さらには炭酸ガス効果¹¹⁾なども期待できよう。ただし高演色性ランプでは臺立ちがあるので、目的によっては適しない。いっぽう中演色性ランプは公称ルーメンも従来型とほぼ同等で、赤外光も十分あるので実効的な成長率が高いし、臺立ちなどもほとんど発生せず、形態の変化も無い。

ここでは、電力コストはもはや最大の経費項目ではなく他の諸費用と同程度になった。このことは、植物工場の最大の難問が解消されたことで、むしろ建築費や設備の償却費用や常雇人件費用なども大きくなる。この状態は一般の製造業と類似しており、名実ともに工場というにふさわしい。

4. 太陽光発電との組み合わせの経済効果

ひとつの発展形態として、太陽電池による発電と組み合わせることが考えられる。著者の以前の論文¹¹⁾ではモデル工場の条件での計算なので、効率が悪かった。そのため、償却を含めると太陽光発電では自立できないと述べた。

しかし、ここで報告したような高効率の新照明手段を使うと、量子効率と同時に設備費効率なども向上する。そこで改めて計算してみた。前報告³⁾の式(5)を基準にして、太陽電池の関係項を付加する。

ここで、太陽電池の面積を $A[\text{m}^2]$ 、太陽電池の単位面積当たりの年間発電による付加価値を $v[\text{円}/\text{年 m}^2]$ 、 p を太陽電池システム価格 $[\text{円}/\text{m}^2]$ 、その定額償却年率を $a'[\text{年}^{-1}]$ とすると、新しい付加項は

$$Av - A pa'$$

である。ここで発電量がちょうど照明や冷暖房の電力消費量を賄うに必要なだけの太陽電池面積を選ぶと、電力費用を発電付加価値で相殺する。つまり

$$Av = L/\eta$$

なので、結局、次式のように太陽電池規模(面積)を陽に含まない表現が得られて見易くなる。

$$G = dx_m \frac{L_0 + L_m}{L_m} \cdot \frac{L}{L_0 + L} - \left(\frac{a}{k} + \frac{pa'}{v\eta} + \frac{1}{f} \right) L - b \quad (4)$$

他の符号は前報告と同様で、 G は年間利潤、 d は出荷単価、 L_0 は飽和照度、 L_m はモデル工場における照度、 L は変数としての照度、 a は設備償却年率、 b は照明設備以外の減価償却や固定費用である。

この式で、 η が見掛け上 $(v/pa')\eta$ に小さくなっただけ不利であるが、これを新しい照明方法で挽回できるかどうかを計算する。

ここで v は、電力単位コストとして高圧電力での 13 円/kWh を採用するので、1859 円/年 m^2 となる¹²⁾。太陽電池システムの価格としては現在の価格¹³⁾(1997 年に 11.7 万円/ m^2)をとって、これを通常の設備と見なして償却 8 年とした場合と、将来の予想数字¹³⁾に従って 2003 年に 5.48 万円/ m^2 になるとし、かつ償却年数は発電設備と見なして 20 年を採った場合について示した。その他の係数にも、前節と同様の数値を使用する。出荷価格も同様に市場競争力のある 85 円/株である。

L を変数として描いたグラフを図 3 に示す。新しい照明方法により、すべての係数が格段に改善されたことで、経済性は著しく高まったが、償却が短いとまだ欠損である。しかし太陽電池の将来の価格低下を考慮し、さらに 20 年償却とすることで確実に利潤を生じることが判る。

図 3 太陽光発電と組み合わせたモデル植物工場システムの利潤

Fig. 3 Estimated profit of a proposed ecosystem of the plant factory combined with a solar cell generator.

この結果は黒字化の可能性を予見させるものであって、従来の計算では経済化は全く論外であったのが、ここまです改善されたことは意外ともいえる。

すべてが最適化された状態では、必要太陽電池の面積は前報告¹²⁾の場合とくらべて、それよりも少なく、植物工場面積の約 2.5 倍で済むだろう。これにより、環境にやさしくて、健全な経営ができるエネルギー自立型光植物工場が将来実現する可能性は高い。

結 論

不完全積分球の近似理論を提案し、これを利用して光照射効率を向上させ、照度を増強する手法を論じた。これにより、ランプの特性係数のうち、量子効率などが実質的に向上する。

また、新しい演色性の改善された高圧ナトリウムランプによる栽培を実験して、経済化に向けて大きな進歩を見出した。演色性の改善されたランプを用いることにより、公称 PPFD からの期待値よりも成長率を著しく改善できることを示した。光質の異なるランプの比較のために、実測成長率で換算する手法を提案した。改善の理由として、赤外光の寄与が大切であること、従って、経済評価には PPFD の概念を拡張修正すべき事を述べた。

植物工場の経済評価には、総合的に見て、積分球と演色性改善ランプとの組み合わせが有利であることを指摘した。

これらのことを組み合わせて、あらためて経済評価を行い、著しい利潤の改善が可能になることを示した。もはや電力コストは経営を圧迫する最大要因では無くなった。

さらに太陽光発電によるエネルギー自立型システムについて再検討し、近い将来における経営黒字を実現できる可能性を指摘した。

謝 辞

ご指導いただいた三浦雅司氏および討論を頂いた鈴木喜代次、鈴木善昭の両氏および飯田市産業経済部長 松村茂利氏に感謝する。

引用文献

- 1) 高辻正基：植物工場の理論，SHITA TECHNOLOGY 1, pp. 1-48(1993)
- 2) 水島宜彦：植物工場理論を基礎とした小規模植物工場の最適経済設計，植物工場学会誌 9(3)：8-18(1997)
- 3) 水島宜彦：植物工場理論に基づいた照明設備の最適化とその実態，植物工場学会誌，11(2)：77-82(1999)
- 4) 吉江 清：完全拡散面の性質，光学技術ハンドブック第 4.2 章，pp. 321-334，朝倉書店(1981)
- 5) 水島宜彦：植物工場理論に基づく移植時期および苗箱構造の最適化，植物工場学会誌，10(3)：151-5(1998)
- 6) 田沢信二：光源，植物工場ハンドブック第 2 章，高辻正基編：東海大学出版会：pp. 35-43(1998)
- 7) 渡辺博之：LED の植物工場への応用，レーザー研究 25, (12)：836-840(1997)
- 8) 柴田和雄：光と植物，第 2 章，pp. 19-46，培風館(1982)
- 9) 相賀一郎，村上克介，崔 海信，清田 信：光に対する植物の生理生態反応，SHITA REPORT No. 8, 日本植物工場学会，pp. 23-24(1994)
- 10) 村上克介，中村 立，児玉邦雄，崔 海信，清田 信，相賀一郎：自然光の赤色光遠赤色光光子比を変化させる植物成長制御用被服材の開発—被服材の設計—，生物環境調節，33(1)：31-36(1995)
- 11) 水島宜彦：植物工場理論にもとづく炭酸ガス施肥の経済効果，植物工場学会誌，10(1)：5-9(1998)
- 12) 水島宜彦：太陽光発電を組み合わせた光植物工場の経済評価，植物工場学会誌，10(2)：61-64(1998)
- 13) 日経エレクトロニクス，日経 BP 社，695：68-82(1997)