

総論 生物への光放射応用技術

Technologies for the Application of Optical Radiation to Bio-industry



1958年生。東京大学農学部卒。兵庫県技術史員を経て大阪府立大学大学院農学研究科博士後期課程終了。学術博士。大阪府立大学助手、講師、助教授を経て現在、三重大学生物資源学部教授。

正会員 村上克介
Katsusuke Murakami

◀キーワード：生物産業，光放射，農業，水産，光合成有効光子束，光束法

◀KEYWORDS：bioindustry, optical radiation, agriculture, fisheries, photosynthetic photon flux, lumen method

ABSTRACT

The relationship between organisms and optical radiation cannot be discussed without relying on some knowledge from illuminative engineering. The lumen method is an important and easy-to-use method for appropriate lighting design. It is also effective when using LED or other newly developed light sources. In this relation, light supplement, plant factories, seedling factories, insect pest control, and fisheries represent important keywords. In this paper, some results of our studies on the cultivation of photosynthetic algae using artificial light; these algae are used in fishery and seedling production.

1. まえがき

前回、「育てるあかり」と題した特集が本学会誌で組まれたのは平成12年、2001年の3月号であった。総論を担当されたのは蓑原善和博士で、著者も当会の光放射と植物育成に関する研究調査委員会などで委員長としてご指導いただき、河本康太郎副委員長や洞口公俊、田澤信二両幹事らとともに活動の仲間に入れていただいた。蓑原博士は引きつづいてUVと生物産業に関する研究調査委員会を組織され、この一連の研究調査委員会の中でオーム社からの「光バイオインダストリー」、養賢堂からの「UVと生物産業」の出版にご尽力され、学会として社会貢献を果たす重要性を範を持って示された。

ところで、2005年に光放射の応用・関連計測研究専門部会が改組され、当時活動されていた会員諸兄のうち著者も含めて多くの方が学会の研究調査活動から去られることになり、その影響もあり、後の情報は紙面でしか得られなくなり、勉強不足の感がある。6年ぶりの特集が組まれるとのことで、著者のような若輩が担当するべきではないが、会員歴も15年になり、細々とであるがいくつかの投稿論文のcorresponding authorも担当させていたでいるので、いささかの貢献になるかもしれないと考え、独善になるかと思うが総論を述べさせていただくこととする。

2. 当時の回想から現在へ

2000年9月、電気四学会関西支部では専門講習会「光放射環境と人・植物・水産」を大阪府立大学で開催した。その折、著者、大阪府大の乾博先生、香川大の岡本研正先生、北海道庁の奥村裕弥先生を講師として招聘し、大阪府大の先端科学研究所講堂は満席の状態になり、実験

現場見学ミニツアーも実施した。乾先生はユーグレナ、岡本先生は開発されたばかりの青色を含むLED利用、奥村先生は餌料藻類と漁業用光源の話題を提供された。著者は照明工学と植物に関する接点についての話題を提供し、これらの当時の知見はその後も変わっているわけではなく、学術的には現在も有効である。

2001年からはや6年になる。まず、前回の特集を振り返れば、著者は「照明工学と植物光環境の計測・評価」を書かせていただいた。この記事は植物と人工光利用の歴史的な経緯、また、照度と光合成有効光量子束密度(PPFD：photosynthetic photon flux density)の違い、PPF(photosynthetic photon flux)とPPFDの用語の使い方、光形態形成とR/FRの話、分光放射計と照度計を民間企業と共同開発した話などを執筆した。その他の記事としては「人工光で真冬に巨峰を収穫」を松下電工(株)の向阪信一氏らが担当され、補光によって栽培された巨峰から、長野オリンピックで関係者が真冬のブドウ狩りを楽しんだ様子を紹介された。また「厚岸産カキを育む人工光餌料培養システム」では、厚岸町の加藤元一氏、ヤンマー(株)の増田篤稔氏らによる種苗センターの解説が行われている。「スーパーに並ぶ人工照明で育った無農薬野菜」はキューピー(株)の佐藤滋氏による傾斜型植物工場の記事であり、「優良均質苗を育てる人工照明苗プラント」は千葉大学の全昶厚氏、「害虫行動を制御する黄色ランプ」は岩崎電気(株)の田澤信二氏、「LEDで育てる野菜」は三菱化学(株)の渡辺博之氏であった。これらタイトルを顧みるに、現在も生物と光放射を論ずる場合、照明知見との接点、補光、植物工場、苗工場、害虫防除、水産関係などが重要キーワードになることは違いなく、本特集においてもこれらの網羅の確認が必要であろう。

その後、当学会誌においては2003年4月号に清水浩先

生が「植物を育てるあかり」と題してやさしい照明技術欄を執筆され、本特集にも寄稿されている後藤英司先生が2005年3月号に「LEDの植物分野への応用」を執筆されている。

今回は植物を後藤先生、また花卉補光を渡辺先生、害虫を青木氏、殺菌、殺カビ技術を木下氏、稲田、有元先生が集魚灯を担当される。残るは水産関係の中で人工光による藻類培養ということになるのか。さて、人工光による藻類培養は餌料用にとどまらず、有用物質の生産にも有効であろう。大型藻類、微細藻類ともにその意味で現在注目されているが、その最大の培養効率を発揮させるには光放射による環境調節技術の確立が基本である。

人工光環境の構築には、照明工学における計算方法を藻類培養水槽に適用することが早道と考え、試したところ、実測値に近い値を得ることができた。藻類培養以外にも使用できる可能性が高い。以下に概要を紹介する。なお、本内容は増田ら¹⁾によるもので計算に用いた引用文献などについて詳しくは同報告を参照されたい。

3. 餌料用微細藻類培養槽における光放射環境設計方法

一般的な照明分野で用いられる被照面の照度の予測計算は、餌料培養に用いる培養槽のような極端な近接照明を対象としていないため、既存の照明設計に用いられている計算式が利用可能か検討する必要があった。光合成促進を行うことを目的とした餌料用微細藻類の培養の光計測は、PPFDが用いられるが、照明分野では照度を用いている。そこで、PPFDを照度に単位換算し、光環境の検討を行った。計算式は、以下のようになる。

培養槽側面の平均照度を E (lx), ランプ光束を F (lm), ランプ本数を N (本), 固有照明率^{*1}を U , 器具効率^{*2}を η ,

保守率^{*3}を M , 光を受ける面積を S (m²), 培養槽の透過率を τ として表すと光束法による照度計算式から、

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

となり、所要のランプ本数 N は、

$$N = S \cdot E / F \cdot U \cdot \eta \cdot M \cdot \tau \dots\dots\dots(2)$$

となる。

光源面と受光面を同じ面積として考え、配光を考慮し固有照明率 U を決め、計算する。

- *1) 固有照明率 (U): 照明器具から放射される光束のうち、受光面に到達する光束の割合。計算に関しては、松下電工(株)製の照明設計アプリケーションソフトの Luminous Planner を使用して求めた。
- *2) 器具効率 (η): ランプを装着した照明器具から放射される光束と使用ランプを単独で点灯したときに放射される光束の比。
- *3) 保守率 (M): 器具の汚れ・光源の点灯時間による劣化を考慮した係数。

4. 計算例

4.1 装置概要

培養槽に、市販の200l透光性ポリカーボネート製アルテミア孵化槽 (SBF-200, アース, 東京) を用いた事例を紹介する。装置のフローおよび配置図を図1, 図2に示す。

培養槽への照射用光源は、現在市販の人工光源の光合成有効光量子束の発光効率の観点から考えて、蛍光ランプまたは HID ランプが有効であるが、近接照射が可能で良好な光均斉度が得られやすい点から蛍光ランプを使

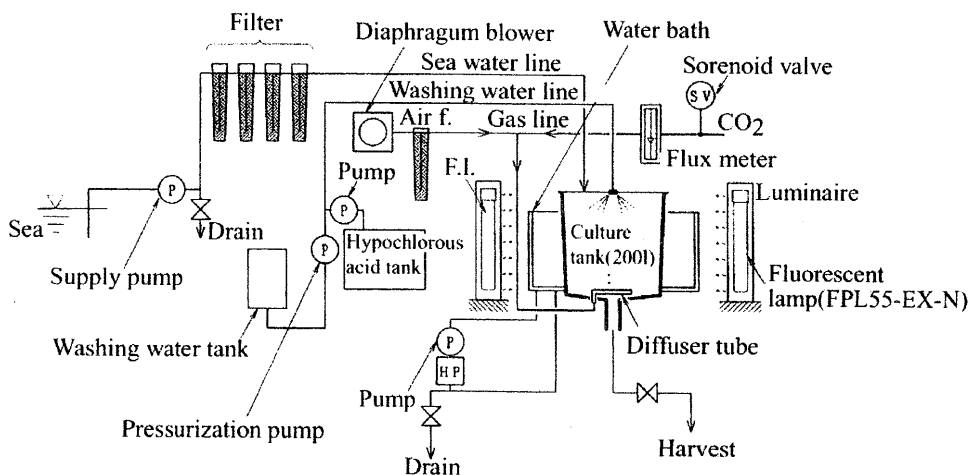


図1 実験装置のフロー
Fig.1 The construction of experimental facilities

The culture tank having a water-bath covered wholly with fluorescent luminaries. It has the functions of aeration control and washing sterilization.

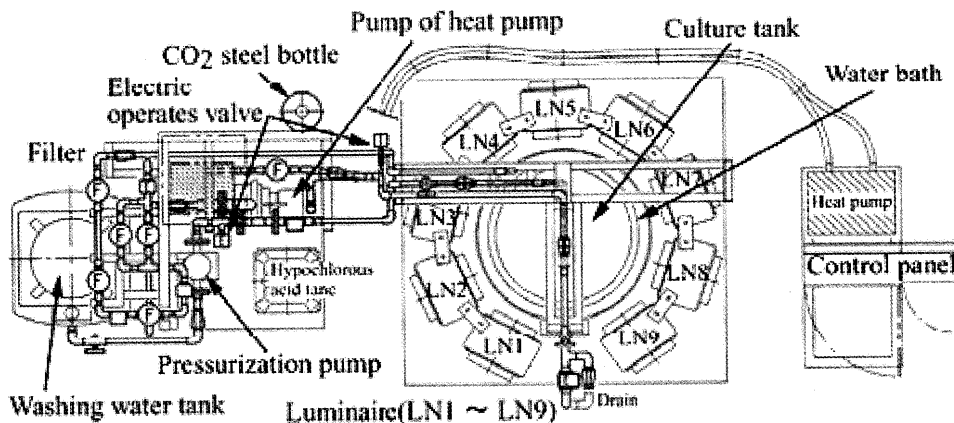


図2 実験装置の配置図
Fig.2 The layout of experimental facilities

The left part includes a washing water tank, filters, electric operated valves, a CO₂ steel bottle and pressurization pumps. Center part includes luminaries, a cultivation tank, a water bath and a drain. Right part includes a heat pump unit and an electric control panel.

用した。培養槽の光照射は、蛍光ランプを装着した照明器具を円形の培養槽の全周をほぼ隙間なく囲むように配設し、ほぼ無影状態で照射できるようにした。照明器具は、現在市販されているランプの中ではコンパクトで高い光束値を有する55Wコンパクト形3波長域発光形蛍光ランプ4灯 (FPL55EX-N, 松下電器産業(株), 長さ560mm, 定格全光束4500lm, 大阪) が装着できる、外形寸法310mm×200mm×1040mmの白色塗装ステンレス製の器具を製作し、培養槽周辺に、ウォータバスと照明器具を設置した。

4.2 培養槽外郭被照面の光環境予測計算

培養槽表面での所要PPFDは、約 $300\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ とした。照度に換算すると約21000lxになる。実際の設計では、安全率や培養実験を考慮し、必要とされる照度の30%増の27000lxを目標設計値とした。

計算に際しては、培養槽形状がほぼ円筒形状を有していることから、有効な照明エリアを高さ方向450mm、半径330mmの円筒形と近似して計算した。円筒形として近似した培養槽の側面の表面積 S は

$$S = 2 \times \pi \times 0.33\text{m} \times 0.45\text{m} = 0.93 \dots\dots\dots (3)$$

ここで、計算式(2)を用い必要な蛍光ランプ本数を計算する。(2)式の計算に必要な係数値は、以下として行った。

$$E = 27000\text{lx}, F = 4500\text{lm}, U = 0.34, \eta = 0.55^{*4}, M = 0.70, S = 0.93 \text{ (m}^2\text{)}$$

これら数値を(2)式に代入して所要のランプ本数 N は

$$N = 27000 \times 0.93 / 4500 \times 0.56 \times 0.55 \times 0.70 \times 0.85 \times 0.85 = 35.8\text{本} \dots\dots\dots (4)$$

となる。

実際の設計に際しては、ランプ本数36本とした。したがって、計算式から予測される平均照度は、 $27150\text{lx} (= 27000 \times 36 / 35.8)$ となる。

4.3 装置の性能実測結果と考察

試作した照明器具の測定結果による光学的特性は、器具効率56%、配光分類BZ5に近似できた。鉛直方向の照度測定位置は、培養槽の150l水深を0cmとし、上方向を正として1点と水面および水面下5点の測定を行い合計7点とし、測定間隔は、6cmとした。また、水平方向は、対向する照明器具の間の水槽内壁面を a として、7cmピッチに11点とした。

設計照度に対応する照明器具全点灯時での初期平均照度は、測定線上の鉛直方向で41800lxを得た。初期平均照度に保守率0.70を乗ざると29280lxとなり、目標照度27000lxに対して、計算で得られた蛍光ランプの本数より、27150lxと計算されたのに対し、実測値は、108%の光量となった。(2)式を用いた平均照度の算出に用いたランプ光束 F 、器具効率 η 、固有照明率 U の数値はいずれも実際とは数%の差異を伴うため、それら差異の積み重ねからして、設計目標平均照度と実測平均照度との差異は許容できる範囲内であると考えられる。

設計照度より8%高くなったのは、照明器具自体が反射板となり、相互反射が生じたためと考えられる。照度均斉度(最小照度/平均照度)は約0.70となりほぼ良好な結果を得た。

種苗生産施設で使用することを前提とした培養槽の設計を行い製作した例では、培養槽表面でのPPFDは、約 $300\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ とし、培養槽の形状は、培養槽内部の光放射環境を考慮し内寸380mm×1570mm×1350mm (R=190mm) の小判型形状で有効培養水量500lになるよう

製作した。

実測照度は、計算で得られた培養槽照射面の算術平均照度 $377 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ に対して、91.7%の $346 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ となった。測定に用いた照明装置は、使用後約500時間経過しており、ランプの光束維持率は初期光束の約95%となり、また、器具の汚れによる照度低下は0.95と想定されるため、保守率は 0.95×0.95 となる。したがって初期照度(E_i)は、 $E_i = 24916 / (0.95 \times 0.95) = 27608 \text{ lx}$ と推計され、予測値と実測値の差はほとんどないと考えられた。

*4) 片口金形3 波長域発光形55W 蛍光ランプ4灯 (下面開放型)の既存器具の器具効率は0.74 (実測値)、試験器具に使用する1 mm 透明アクリルの透過率は0.93 (カタログ値)、ランプ交換を後部からするため反射板をランプ後部の白色平板で代用することによる器具効率低下を0.80 (仮定値)とすると、試作器具の予測器具効率(η)は $0.55 (= 0.74 \times 0.93 \times 0.80)$ となる。固有照明率 U および器具効率 η は、実用例を基にした推定値。保守率 M は、設定値。

5. おわりに

以上のように光束法を用いて生物へ光放射応用を行う場合、照度計算法は大変有効であり、活用が望まれる。

今、LEDの発光効率向上が国家プロジェクトとされて推進されているが、光合成促進を基本とする人工環境植物栽培の分野では、まだ蛍光ランプやHIDランプに比べて発光効率が低く、実験用として狭帯域の分光特性を活用する場合を除き実用的にはむずかしい。それでも

近接効果を利用して植物工場に利用する例などが増加し、農業電化誌では2004年から2005年にかけて特集記事が組まれた²⁾。LEDの光束を求める方法が整備され、同様の適用が可能となりつつある。

研究の進展は光源側から見る場合と生物側から見る場合の2通りに分けて考えなければならない。そして、照明工学で培われた計測技術および照明計算の適用を図り、必要な場合はシミュレーションを行うことである。培養装置はまさしくその例であり、今後すべての光生物産業分野にて使用を検討すべきと考えている。

参考文献

- (1) 増田篤稔, 向阪信一, 洞口公俊, 村上克介: 微細藻類の大量培養装置開発事例, 生態工学シンポジウム「水産海洋における閉鎖系施設の現状と光による環境調節技術」講演論文集, pp.28-35 (2007).
- (2) (社)農業電化協会: 特集: LEDの農林水産分野への応用(1)~(8), 農業電化誌, 2004年9月号~2005年3月号, 2005年5月号, 2005年7月号~8月号 (2004, 2005).

連絡先

〒514-8507 三重県津市栗真町1577
 三重大学大学院生物資源学研究所共生環境学専攻
 Department of Environmental Science and Technology,
 Graduate School of Bioresources,
 Mie University, Tsu, Mie, 514-8507, Japan
 E-mail: murakami@bio.mie-u.ac.jp

照明学会・技術規格頒布のお知らせ

非常時用照明の基準JIEC-004 (2005)

(目次)

1. 目的
2. 適用の範囲
3. 用語の定義
4. 非常時用照明の種類
5. 避難照明
6. 安全照明
7. 安全標識
8. 電源システム
9. 保守

印刷: 平成18年4月

発行: 平成18年4月

税込価格: 630円

会員特価: 472円

送料: 1冊 240円

申込方法: 必要事項(書籍名, 部数, 住所, 氏名, 電話, FAX, 会員は会員番号)を明記のうえ, 事務局までお申し込み下さい。

社団法人 照明学会事務局 中村三七雄

〒101-0048 東京都千代田区神田司町2-8-4

TEL: 03-5294-0101 FAX: 03-5294-0102

E-mail: ieijken@sepia.ocn.ne.jp