

のり人工培養槽に用いる光源の検討

誌名	日本水産學會誌
ISSN	00215392
著者	今田, 克 安藤, 真 齋藤, 祐一
巻/号	52巻9号
掲載ページ	p. 1501-1508
発行年月	1986年9月

のり人工培養槽に用いる光源の検討

今田 克, 安藤 真, 斉藤 祐一

(1986年1月27日受理)

Study of Light Source for Laver Culture Vessel

Osamu Imada,* Shin Ando,* and Yuichi Saito*

The light source used for an artificial culture vessel of laver thalli on a larger scale was investigated. Fluorescent lamps and H. P. mercury lamps (especially thallium mercury lamps) were chosen from standpoints of output, light efficiency and the shape of the bulb. Incandescent lamps were eliminated from consideration of output and light efficiency. These lamps were designed in a longitudinal water dipping style and prepared with a protective tube corresponding to the higher culture density of the laver thalli.

The test results of each lamp's characteristics are as follows: 1) The fluorescent lamp gives uniform lighting on overall length but its output is only enough for low culture densities, and the temperature of the bulb surface is too low to attain optimum lighting when it is placed underwater. 2) The high pressure mercury lamp and thallium mercury lamp were designed for uniform lighting through an extended illuminating tube in spite of the demand for high voltage for activation or some separate illuminating tubes connected electrically parallel and inserted in one lamp. These lamps have the most suitable characteristics for a light source under high culture densities of culture vessels.

The relationship between light intensity (L), distance from light source (X) and culture density of laver (C) was shown as the following exponential equation according to experimental results.

$$L = L_0 \cdot 10^{-1.72 \times 10^{-4}(C+1.10)X}$$

L_0 means light intensity on the bulb surface. For the present condition, $L = 5.5$ klx, $C = 100$ g (dry)/100 l, $L_0 = 200$ klx are chosen. X was set at around 50 cm. These numbers were realistic from an engineering standpoint, applying dipping style's high pressure mercury lamp or thallium mercury lamp as a light source, and therefore these numbers were determined to be the desired ones from the culture test.

前報¹⁾で述べたとおり、のり葉体培養槽に適用する照明方法、すなわち培養密度と光源出力、光源間隔について検討し、具体的な光源の選択、更にいくつかの光源の設計を行なった。本報はこれらについて報告する。

方法及び材料

光源 前報で報告したのり人工培養槽、すなわち主培養槽 (テスト用, 2.7 m³, 内径 1.5 m, 高さ 2 m), 前培養槽 (400 l, 内径 0.8 m, 高さ 1.1 m) に常備する光源の検討を行なった。光源は後述の培養密度との関係から水中点灯型が必須であるので保護筒 (バイレックスガラス製, 及びメタアクリル樹脂製) に収容し, 保護筒までは耐海水性キャプタイヤードを用いて電源と接続し, 絶縁を確保するものとした。このため白熱電球は形状, 発光効率, 発熱量等の不利から当初より対象外とし, 蛍

光灯, 高圧水銀ランプを検討対象とし, 殊に高圧水銀ランプは常用の高圧水銀灯の他にタリウム水銀灯も選択し, 構造を種々検討し試作を試みた。具体的には蛍光灯は東芝電気(株)製超高出力パワーライン蛍光灯, 110W, 220W を用い, 水銀灯は日本電池(株)の協力を得て高圧水銀灯では 1kW, 1.2kW, タリウム水銀灯では 300W, 900W, 3kW を設計試作し, 試験に供した。これら光源の諸元を Table 1 に, 概要図を Fig. 1 にそれぞれ示す。

供試光源の中, 蛍光灯は発光管単位面積当りの出力が少ないので水中点灯時, 管壁温度が発光に至適な状況で保持できるかが問題であるので, 管壁温度と保護筒表面の照度を対比して実測した。温度測定は発光管壁の数ヶ所に銅コンスタンタン熱電対検出部を貼着し, mV メーターで熱電力を測定して求め, 一方保護管表面照度は東

* 協和醸酵工業株式会社 (Kyowa Hakko Kogyo Co., Ltd., 1-6-1 Ohtemachi, Tokyo 100, Japan).

Table 1. Characteristics of test trial lamps

Examined lamps	Lamp details							Protect tube				
	Output (Watt/lamp)	Length (m/m)		Dia. (m/m)	Composition (W×No.)	Volt	Amp.		Dia. (m/m)	Length (m/m)	Coolant	Maker & type-No.
White* ¹	110	Total	1150	1100	32	100×1	100	1.1	100	1800	No	Toshiba power-line
		In water	1150	1100	32	100×1	100	1.1	100	1800	No	Toshiba power-line
Fl. L	220	2350	2300	32	220×1	100	2.2	100	2500	No	Toshiba power-line	
H.P.* ²	1000	1580	900	60	1000×1	800	1.4	150	1800	Air	GS HQW-1000G	
Hg. L	1200	1500	100×3	50	400×3	130	7.5	150	1800	Air	GS HQW-1200-T	
T.Hg.L* ³	300	470	250	50	300+1	125	2.0	80	400	Air	GS Gh-Hg.-300	
	900	1320	1000	60	300×3	350	2.8×3	150	1800	Air	GS HQW-900G	
	3000	2250	1400	1300	3000×1	900	3.6	150	1800	Air	GS HQW-3000G	
3000	2250	14000	220×4	60	750×4	225	3.8×4	150	1800	Air	GS HQW-3000G-T	

*¹; White fluorescent lamp, *²; High pressure mercury lamp, *³; Thallium mercury lamp

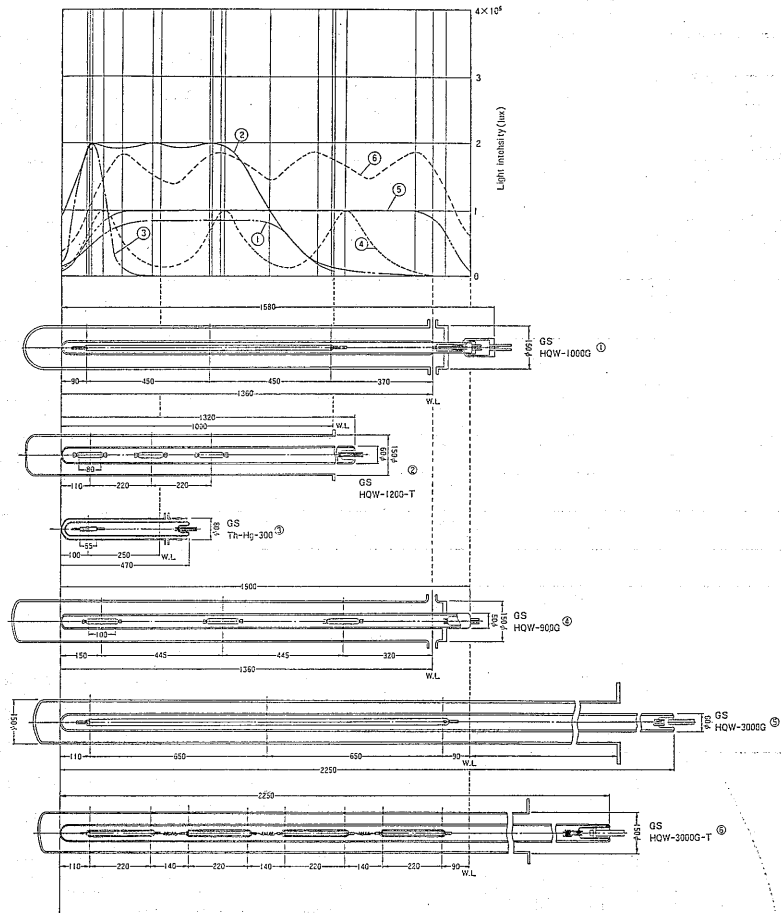


Fig. 1. General view of examined lamps and their distribution curves of light intensity as 125 mm distance (lamp's type No. shown on Table 1).

①: GS HQW-1000G, ②: GS HQW-1200-T, ③: GS Th-Hg-300, ④: GS HQW-900G, ⑤: GS HQW-3000G, ⑥: GS HQW-3000G-T

芝5号照度計をポリエチレン袋に収容して懸吊し水中で実測した。

光源間隔, 光源出力と葉体培養密度 光源の設計試作を行なうに先立って光源の光量, 光源からの距離, 葉体培養密度の三者の関係について基礎的検討を行なった。即ち標準的なモデル条件下での照度を実測し, 三者間の関係式を求め, これより光源出力の必要な範囲を推定した。具体的には 78 l (65 cm×33 cm×55 cm) のガラス槽に葉面積 1~25 cm² のアマノリ葉体を 50, 100, 200, 300, 500 g (wet) 浮遊せしめ, 側面より 400W 高圧水銀灯を用いて, 槽内壁での照度が 10, 20, 30 klx になるように照明し, これを基準に水深 10, 20, 30, 40, 50 cm に東芝製5号照度計を懸吊して, その位置での水中照度を測定した。照度計はポリエチレンフィルムに包み防水したが, このフィルムによる測定誤差は無視できるものであった。供試アマノリ葉体は遠心分離機で脱水したも

ので, 湿重/乾重の比は 4.9 である。またのり葉体を照度計の受光面に 1, 2, 3 枚重ねて貼着した時の照度の变化を実測し, のり葉体の遮蔽の程度を確認した。

結 果

光源 Table 1 及び Fig. 1 に示したように主培養槽及び前培養槽に適用する光源はすべて棒状とし, 水中心灯するため主培養槽は 2.4 m, 前培養槽は 1.5 m の中に全長を抑え, 特に水銀灯では発光部分がそれぞれ 1.36, 1.0 m に収まるように設計した。Fig. 1 に水銀灯の配光曲線を示したが, 水銀灯は発光管が短く, 集約的な発光となるので意識的に長尺発光管を試作し, あるいは高圧水銀灯 1.2 kW, 900 W, タリウム水銀灯 3 kW 等用でいたように発光管を数本並列回路に縦に連結して一本の管球とし, 出来る限り光源管軸に対して平行な照度分布が得られるように工夫した。長尺発光管は励起電圧が高

Table 2. Test results of lamps by culture of laver

Lamp Type	Output (W/Lamp)	Protect tube	Surface temp. of lamp (°C)			Cooling Air l/min.	Surface light intensity of protect tube (Klx)			Remarks
			Bottom	Middle	Top		Max.	Min.	Av.	
White*1 Fl. L	110	Pylex glass 100 mm	18	40	55	no	40	—	24	After 3 hours illuminated
	110	Metacryl Double 150 mm	26	70	58	no	28	—	15	—
	220	Metacryl Double 150 mm	32	30	55	no	30	—	15	—
H. P.*2	1000	Metacryl 130 mm	40	80	80	10	60	—	30	—
Hg. L	1200	—	40	80	80	10	200	60	150	—
	300	—	40	60	60	1	310	—	150	—
T. Hg.	900	—	40	80	80	10	180	30	70	—
L*3	3000	—	60	80	90	30	150	—	140	—
	3000	—	60	80	90	30	300	80	190	—

*1; White fluorescent lamp, *2; High pressure mercury lamp, *3; Thallium mercury lamp

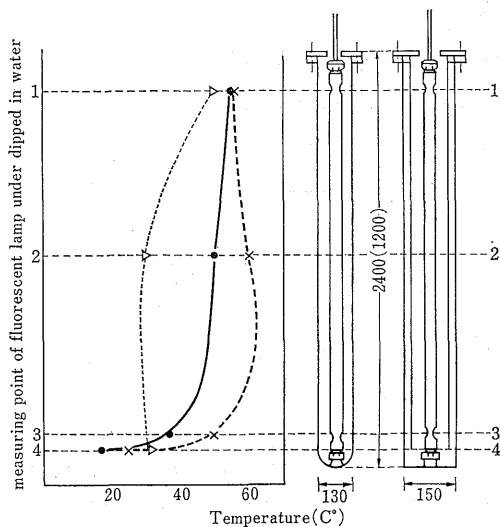


Fig. 2. Fluorescent lamp surface temperature after 3 h illumination in protect tube dipped in water.

- △--△: 220W lamp inserted in double tube of metacryl resin's protect tube.
- ×--×: 110W lamp inserted in double tube of metacryl resin's protect tube.
- : 110W lamp inserted in pyrex glass tube.

vertical axis was shown measuring points of fluorescent lamp, 1: Top side mercury pocket, 2: Center, 3: Bottom side mercury pocket, 4: Bottom end.

くなり不利であるが、並列回路に連結する方式は発光管をある間隔にわけてセットできるので光の分散化を図る

と共に励起電圧を高くする必要が無いので、すぐれた方法といえよう。これら電灯の性能を Table 2 に実測結果として示した。蛍光灯は水中点灯時、水銀の昇華に十分な管壁温度が得られるかを検するため管壁温度の測定を行なった。結果を Fig. 2 に示した。この試験では保護筒にパイレックスガラス製一重管と、メタクリル樹脂製の二重管を用い比較した。(Fig. 2 に保護筒概略と寸法及び測定点を併記した。) 測定は点灯後 3 時間以上の定常温度値で、Fig. 2 で判断すると、発光管壁温度は保護筒底部で最も低く、一重管では 20°C にしか達していない。一方高圧水銀灯、タリウム水銀灯では一灯当りの出力が大きいため保護筒内温度は過熱状態にある。そこで軟質塩化ビニール管を保護筒内壁に沿って筒底まで導き、乾燥空気を送って換気し乾燥と放熱を保った。

光源間隔と葉体培養密度 のり葉体の培養密度と照度、水深の関係を Fig. 3, Fig. 4 に図示した。Fig. 3 は縦軸に透過光照度 (lx) を、横軸に水深 (mm) をとり、15, 30, 60, 90, 150 (dry) g/cm³ の葉体濃度別に光源照度 1×10⁴, 2×10⁴, 3×10⁴ の各点の結果を図示した。Fig. 4 では逆に横軸に葉体濃度 ((dry) g/m³) をとり、100, 200, 300, 400, 510 mm の水深別に図示した。またのり葉体 1 枚重ねの遮光率の実測結果を Fig. 5 に示した。これらの図は片対数目盛でいずれも直線性が認められるので指数函数

$$L = L_0 \cdot 10^{-1.72 \times 10^{-4}(c+1.16)x} \quad (1)$$

または

$$L = L_0 \exp \{3.96 \times 10^{-4}(c+1.16)x\} \quad (1)'$$

と示すことができる。ここで L はのり培養液透過後の

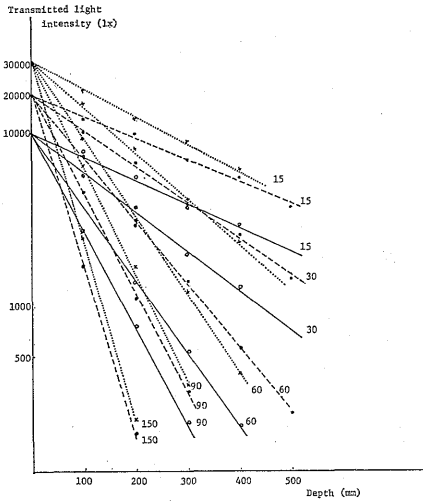


Fig. 3. Relationships between liquid depth and transmitted light intensity for various laver culture density and output of light sources. [Index numbers on the figure were shown culture density (dry g/100l)].

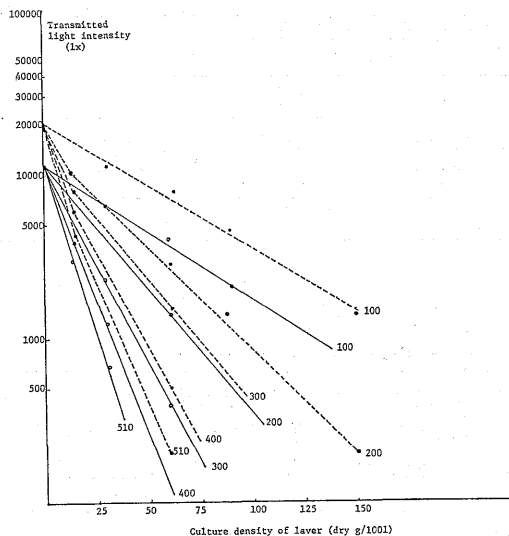


Fig. 4. Relationships between culture density and transmitted light intensity for various depth and output of light sources. (Index numbers on the figure were shown water depth (m/m)).

光の照度 (lx), L_0 は $x=0$: すなわち管壁=保護筒表面での照度, x は光源からの距離 (mm), c は各葉体培養濃度 (g (dry)/100 l) である。

一方, のり葉体1枚重ねの遮光率 (r) も同様に $L = L_B(1-r)^n$ で求められる。 L はのり葉体透過後の照度 (lx), L_B はプランク照度 (lx), n はのり葉体の重ね枚数で, Fig. 5 より

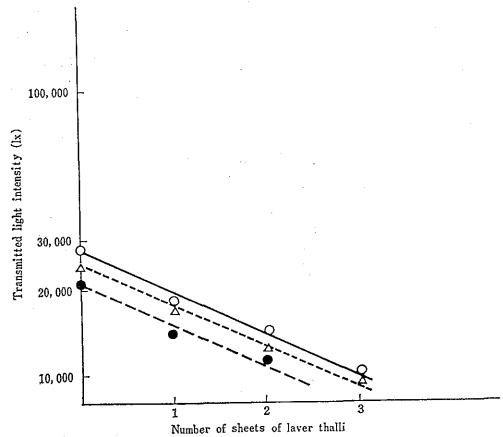


Fig. 5. Transmitted light intensity passed through several times covered laver thalli. (Water depth ○—○ 10 cm, △—△ 20 cm, ●—● 30 cm).

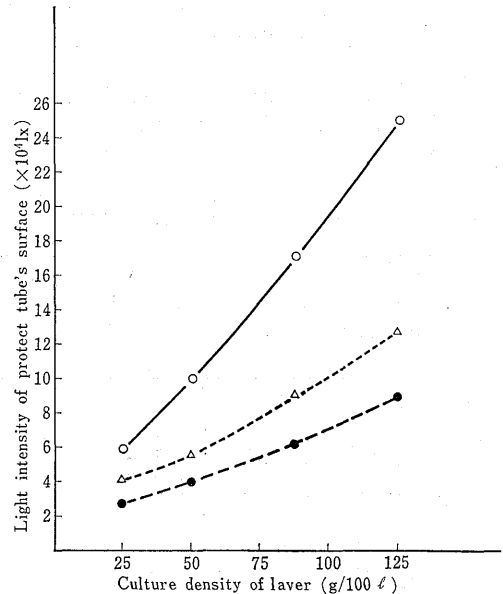


Fig. 6. Requested light intensity of protect tube's surface correlated with culture density of laver and calculated distance of light source based on 5.5 klx av. received. (calculated distance ○—○ 500 mm, △—△ 400 mm, ●—● 300 mm).

$$L = L_B \cdot 0.721^n \quad (2)$$

となり, $n=7$ で 90%, $n=10$ では 95% の光が遮光されることになる。

光源が棒状であるので (1) 式を単位長さの円筒光源より出る光として, 光源より x の距離の円周上での受光量は $2\pi x \cdot L_0 e^{-cx} / 2\pi x$ である。この値をその位置の全面積 (S mm) で除すれば平均受光量が求まるので, $x=0 \sim x_0$ までの総受光量平均 M (lx) は次の式となる。

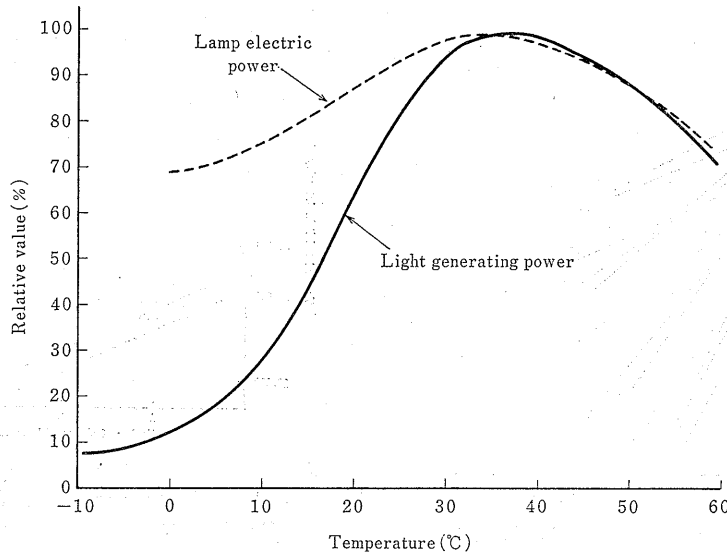


Fig. 7. Temperature distribution curve of FL lamps under constant lamp output condition. (●—● light generating power, ×---× lamp electric power)

Table 3. Requested light intensity of protect utbe's surface correlated with culture density of laver and calculated distance of light source based on 5.5 klx ave. received

	Distance of light source (mm)	Culture density of laver thalli [(dry)g/100 l]			
		25	50	87.5	125
Requested intensity	300	27,800	40,800	63,200	89,200
(1x) at protect tube	400	41,900	55,500	90,100	128,000
Surface of light source	500	58,700	101,000	172,000	250,000

$$M = \frac{1}{S} \int_0^{x_1} 2\pi x \cdot \frac{L_0 e^{\alpha x}}{2\pi x} dx \quad (3)$$

ここで α は (1) 式より導かれて

$$\alpha = -(3.96e - 2.4) \cdot 10^{-3}$$

である。実際は光源は保護筒 (外径 x_1) に収められているので (3) 式の $x=0$ は $x=x_1$ に補正されねばならない。即ち (3) 式は

$$M' = \frac{L_0'}{\pi(x^2 - x_1^2)} \int_{x_1}^x e^{\alpha(x-x_1)} dx \quad (3)'$$

となる。 L_0' は単位長さの保護筒表面より出る光束, x_1 は保護筒半径で保護筒の単位長さの表面積を A とすると $L_0'/A = L_s$ として, L_s は保護筒表面の照度を意味する。(3)' 式の x_1 を実際に用いた保護筒半径 6 cm とし, M' をノリ生育に最適な 5.5 klx とすると, Table 3 が得られ, これを図示すると Fig. 6 になる。図より平均照度 5.5 klx, 且つ最大照度を 200 klx 以下にするには x は 50 cm 以下, 葉体密度は 100 g (dry)/100 l 以下ということになる。

考 察

光源は槽が大型化し, 葉体の培養密度が高くなると, どうしても液中に挿入せねば充分の光を与えることができない。これは照度が距離の逆乗則に従うことから当然である。大型の液相光化学反応器でも紫外線灯を用いたアルデヒドの附加反応や, ベンゼンの塩素化などが知られており, 更に高圧水銀灯を用いたシクロヘキサンのニトロ化反応は東レ法として著名であるが,²⁾ これらの液相光化学反応器でも棒状光源が専ら用いられ, 光源は反応液中に上方より浸漬され, 液中で点灯する方式がとられている。理論的には液中照明では点状, あるいは円環状の光源は均一照明の点で有利であるが, 具体的な設備としてはリード線の保持, 絶縁等が煩雑で困難である。特に今回の対象液は海水で漏電の危険が高く, リード線の接続はすべて水面上で行なえる棒状光源とした。

電灯は比較的薄いガラス製で衝撃に弱く, 且つ点灯中は多量の熱を発生し, 水滴による急冷破損も生じかねないので保護筒に収めた。今回のテストではパイレックス

ガラス製とメタクリル樹脂製の保護筒をそれぞれ用いたが、前者は重量がかなり大きいことや懸垂部の強度保持に留意する必要があること、後者には長期使用すると樹脂の劣化による破損や表面の瑕瑾による光の透過率の低下、微小藻の着生などの難点が認められた。しかしこれらの点は予防保全によって回避できるもので、約2年間の培養試験ではトラブルは生じなかった。この間もつとも長期間の連続使用は1ヶ月以上に及んだ。ただ保護筒の槽への固定は上部フランジで行なったが、槽の液位の上下によって保護筒には浮力と重力がそれぞれ加わることになり、光源の交換や追加に際しては液位をバランスのとれる位置に合わせるが必要であった。

光源としては蛍光灯、高圧水銀灯、タリウム水銀灯を用いたが、これらの波長特性とのり培養に対する影響については既報の通りタリウム水銀灯が適している。³⁾ タリウム水銀灯、高圧水銀灯はいずれも高圧水銀ランプの一種で蛍光灯よりも単位管長当りの出力は100倍も高い。また発光管長を短くして球状光源として多用されている。しかし培養槽でのり葉体の運動は前報で述べた通りドラフトチューブで規制された気泡流に随って上下循環を繰返しており、配光はこの流れに平行して平準化されていることがのぞましい。このため今回の試作では高圧水銀灯もタリウム水銀灯も発光管長を励起電圧を高くして長くするか一本の電灯の出力を数本の発光管に分割し、これらを並列回路で点灯することによって光量の分散をはかった。Table 1 及び Table 2 に示した1kW水銀灯、3kWタリウム水銀灯では発光管長を長くしたものであり、1.2kW水銀灯や900W、3kWタリウム水銀灯では分割点灯の方式を用いた。これらの光源の配光は Fig. 1 に示した通りで、大略水中全域に対して均等な光を与え得ると思われる。なお分割点灯方式は数本の発光管を内蔵しているが発光管寿命を同一にすることが困難で一本が切れても分散は不均一となるわけであるが1年間の試験中にかかる不備は生じなかった。保護筒内に収容した光源の外観と培養槽中で点灯している状況を写真で前報に示した。

一方蛍光灯は超高出力球で検討したが、管球表面照度は70klxとなり、100mm径の保護筒に収容した場合にはその表面で24klxとなる。既報⁴⁾で間欠的照明を用いた場合の光の効果を検討したが、平均照度5.5klxの場合に5倍以内の照度変化は均一照明とほぼ同等の効果を示すので、蛍光灯はかかる意味では勝れた光源である。ただ光量が少ないのであくまで培養密度の低い期間の補助的光源として使用するに限られるが、水中点灯の場合には Fig. 2 に示したように管球温度の最低部が定常時でも20°Cにしか達せず、蛍光灯の出力と管球温度の関係を示す Fig. 7 の図⁵⁾よりわかる通り最適条件下の

60%弱の出力しかないことになり、更に工夫の要するところである。

のり葉体培養密度は培養槽の能力を決める基本因子で人工培養の経済性を検討するにはこれを如何に高くできるかが鍵である。培養密度を支配する要因はいくつも考えられるがもっとも大きな要因は光であって、光源出力、光源間隔は装置設計上もっとも重視する事項である。高圧水銀ランプは一球当りの出力が大で高培養密度の場合でも充分な光量を与え得る光源であるが、逆に過度に強光では却って強光障害を招くおそれがある。既報⁴⁾でこれらに就いて検討した際の結果では、平均5.5klxの照度を200klx-1.2klxの幅で間欠照明で与えた場合には5.5klxの定照度照明の80%ののり葉体の生育が得られた。この結果から、光源の最大照度を200klxとして、平均照度5.5klxを与えるような範囲の培養密度、光源出力、光源間隔を Fig. 6 より求めてみると、例えば培養密度100g(dry)/100lとすると最大照度200klxでは光源間隔は50cmということになる。100g(dry)/100lという培養密度は天然漁場の網糸周辺を考えても、とても有り得ない高培養密度であって、おそらく天然環境の10倍以上と考えられる。一方この培養密度は筆者らがのり培養を工業的に考える際の一つの目標値で集約化のメリットの出せる水準である。幸い上述のようにこの培養密度でも光源間隔を50cmにとれば良いということであればこの光源間隔は技術的に可能な範囲であるから、一応培養槽の設計はこの数字を基準とすることとした。即ち以後の培養実験ではこの光源間隔、光源出力を基準とし、実測した平均照度で葉体培養密度を修正し光源本数を増減させる方法をとった。

光源出力と培養密度に関する検討は従来あまり報告が無く、下茂⁶⁾がのり葉体の人工培養研究において日生長率を生長効果、密度効果、照度効果、相互遮蔽効果などの相互作用として把え検討している中に培養密度と光の透過率の関係を実測している。しかしこの値を今回の実験値と比較すると高密度培養区において光の透過量が非常に大きく対比することができなかった。あるいは測定方法の相違によるものではないかと思われる。

要 約

1. のり葉体の人工培養用光源として大型槽に用いる光源を選択した。光源は蛍光灯、高圧水銀灯、タリウム水銀灯を用い、形状は壘型棒状とし、保護筒に収め、液中点灯方式とした。水銀灯は特に設計し試作した。
2. 蛍光灯は低培養密度用であるが、水中点灯時は管壁温度を維持する工夫が必要である。
3. 水銀灯は高培養密度用であって、発光管長を伸ばすか数ヶの発光管を分割し並列点灯する方式で所期の光

源を試作し得た。

4. 光源出力, 光源間隔, のり葉体培養密度の間には指数関係が存し透過照度 L は光源管壁照度 L_0 , 葉体培養密度 c , 光源距離 x によって次式で示される。

$$L = L_0 10^{-1.72 \times 10^{-4}(x+1.16)c}$$

これから $c=100 \text{ g/100 l}$, $L_0=200 \text{ klx}$, $L=5.5 \text{ klx}$ とすると, x は 50 cm となる。

終りに臨み, のり人工培養研究の機会を与え且つ終始御指導, 御鞭撻をたまわった協和醸酵工業株式会社, 会長木下祝郎博士に深謝いたします。

文 献

- 1) 今田 克, 宇垣友淳, 安藤 真, 斉藤 祐: 日水誌, 52, 1323-1338 (1986).
- 2) 菊池眞一, 濱野裕司: 光化学, 第7版, コロナ社, 東京, 1980, pp. 79-88.
- 3) 今田 克, 斉藤祐一: 日水誌, 48, 1517-1524 (1982).
- 4) 今田 克: 日水誌, 50, 931-936 (1984).
- 5) 電気学会: 照明工学, 改訂8版, オーム社, 東京, pp. 88 (1984).
- 6) 下茂 繁: 農電研究所報告, 71002 (1971).