光源制御をマイタケの生体電位の自発性リズム変動に連動させた茸栽培の試み

平間淳司¹・松岡大輔²・松井良雄³・西堀耕三⁴

¹ 金沢工業大学工学部 光電磁場科学応用研究所 921-8501 石川県石川郡野々市町扇が丘 7-1

² 株式会社シーテック 467-8520 愛知県名古屋市瑞穂区洲雲町 4-45

³ 金沢学院短期大学 食物栄養学科 920-1392 金沢市末町 10

⁴ (KK) 雪国まいたけ 949-6695 新潟県南魚沼市余川 89

Mushroom Farming using Illumination Control by Synchronization with the Spontaneous Rhythm of the Bio-electric Potential of *Grifola frondosa* (Maitake Mushroom)

Junji HIRAMA¹, Daisuke MATSUOKA², Yoshio MATSUI³ and Kouzou NISHIBORI⁴

¹Kanazawa Institute of Technology, Advanced Optical Electro Magnetic Field Science Laboratory,
7-1, Ohgigaoka, Nonoichimachi, Ishikawa, 921-8501, Japan

²C-TECH Co., Ltd., 4-45, Sugumo-cyo, Mizuhoku, Aichi, 467-8520, Japan

³Department of Food & Nutrition, Kanazawa Gakuin College,
Sue-machi 10, Kanazawa, Ishikawa, 920-1392, Japan

⁴Yukiguni Maitake Co., Ltd., 89, Yokawa, Minamiuonumashi, Niigata, 949-6695, Japan

Abstract

In our previous study of responses of bio-electric potential of the *Grifola frondosa* fruit body, it was revealed that the bio-electric potential changed according to different light stimuli and the farming environment. Furthermore, it was shown that the changes accompanied a spontaneous, semi-cyclic, biorhythm. Based on these results, in this study, we suggest a new farming technique (using a fruit body as a biosensor) that uses light stimuli, synchronized with the spontaneous rhythm of the bio-electric potential. The illumination (light-dark time) was experimentally controlled in accordance with the fluctuation of bio-electric potential over a period of one hour. Results indicated that good morphogenesis was able to be achieved under controlled illumination, when compared with the conventional intermittent illumination, 12L12D (12 hours light and 12 hours darkness), or continuous lighting.

Keywords: bio-electric potential, biorhythm, light control, *Grifola frondosa*, morphogenetic properties

緒 言

近年、低カロリーでリグニンや β -グルカンなどの機能性成分を含み食物繊維が豊富な茸類は、健康食品として注目され

需要が拡大し、茸工場での人工栽培が普及している。従前から人工栽培での栽培環境条件は、現場の生産者の経験により確立されてきたが、科学的な根拠の裏付けが遅れている。これまでに我々は、マイタケ、エリンギ、ナメコなどの茸の栽培現場での聞き取り調査に基づいた環境条件を踏まえ、子実体の生体電位を計測し生長促進に作用する最適生育条件を科学的に検討してきた。

その結果、子実体の生体電位が大きく誘発される光刺激を連続的に与えると、子実体の発達が促進されることや、連

2007 年 9 月 21 日受付

2008 年 2 月 12 日受理

Corresponding author: Junji Hirama

(kit83013@neptune.kanazawa-it.ac.jp)

続的な光照射に比べて断続的な照射を与えると、さらに子実体の発達が促進することから、生体電位変動と生長とは密接に関わっていることを明らかにしてきた^{1,2)}。そして、連続的な光照射であっても生体電位には自発性の概周期的なリズム変動が存在すること³⁾などを明らかにしてきた。さらに、マイタケの子実体では、30分間隔の点滅光で生体電位が顕著に誘発することを踏まえ、30分や15分間隔の点滅光で形態形成の比較も行った。その結果、生体電位の変化が最も顕著な15分間隔照射では菌傘が良く展開する形態形成を示した。

本研究では上記の研究成果に基づき、特にマイタケの自発性生体電位に含まれる概周期性の生体リズム変動特性に着目し、茸工場における生産性の向上を目指す新たな光源制御方法を提案する。すなわち、マイタケをバイオセンサとして生体電位信号をモニタリングし、「光源制御を生体リズムに連動させたマイタケ栽培技術」を試みた。

実験方法

1. 形態形成および生体電位計測装置

Fig. 1は、過去に我々が試作した種々の光の波長や強度を提示できる形態形成実験装置^{1,2)}に新たに光源制御装置を組み込んだ実験システムを示す。本装置はチャンバ（容量

約36 l）を7個備えており、各チャンバにてマイタケ (*Grifola frondosa* (Dicks. Fr.) S. F. Gray) を栽培した。いずれのチャンバ内も空気組成は、温度18℃、湿度90% RH、酸素濃度21%、二酸化炭素濃度500～800 ppm一定とし、PCでチャンバ内の空気循環を均一に制御した。

原基形成後5日目のマイタケ菌床を供試体とし、14日間栽培して最終日の形態形成の比較をした。なお、栽培期間中にはそれぞれの子実体上部に誘導電極として塩化銀膜を生成した約φ0.5 mmの正極の銀針電極を挿入し、負極をその下部約1 cmの部位に、不関電極をマイタケ子実体と菌床との境目に、それぞれ深さ約1 cmで挿入した。そして、雑音対策を十分施した（分解能は約10 μV以下）自作の生体電位アンプ（CMRR: 120 dB以上、S/N比約80 dB）を介して、誘発した生体電位の変化をPCにて1分間毎に記録した。実験回数はのべ3回とした。また、光源には我々がこれまでに子実体の生長が良好であることと生体電位が大になることを報告¹⁾している自作の青色LED（λp = 468 nm）パネルを用いた。なお、マイタケ菌傘上部とパネルとの距離は常時3 cmとし、光の強さは6 Wm⁻²一定とした。また、実験終了後、新鮮重の比較も行った。

2. 生体電位のリズム変動に連動した光源制御

過去に我々はマイタケ子実体上部に、青色光を光の強さ6

図1 形態形成実験装置システム
Fig. 1 Experimental system for observing growth.

図2 生体電位信号と光源制御との関係
Fig. 2 Itemization of the chambers.

Wm^{-2} で長期間に渡り連続照射した場合の生体電位変動を観測した。その結果、概周期的な生体リズム運動を伴いながら生体電位が変化することを明らかにした³⁾。また、生体電位変動が大となる光刺激を提示することで、菌傘の展開が発達したり、新鮮重が増加するなどを明らかにしてきた^{1, 2)}。また、自然界の様々な物理現象や生物の生体生理特性などに多く観測される $1/f$ ゆらぎ⁴⁾を付加した光刺激を与えることや、数時間（約10時間）周期や短時間（数10分）周期の間欠的な光照射により、子実体の生体電位を強制的に誘発させることで生長が促進する結果も得ている。このように光刺激の提示条件が形態形成に及ぼすことがわかっていく⁵⁾。

そこで、今回は新たな試みとして茸の生体リズムを伴った自発性生体電位信号に連動させて、光刺激の点灯制御を行うことで、形態形成へ及ぼす影響を検討した⁶⁾。

Fig. 2は、Fig. 1に示した光源制御部分における生体電位信号と光源制御との関係を示す。子実体の生体電位変化をモニタし、自発性の生体電位のリズムに連動させて光源を制御する個体側をマスタと定義した。一方、マスタの電位変動に連動して強制的に光照射のON/OFFをさせる個体側をスレーブと定義した。本研究では特定の1個体のマイタケをバイオセンサとして生体電位のリズム変動を計測し、これに基づき茸工場全体の茸の光源を制御するシステムの構築を目標にしている。今回はマスタとスレーブの3個のペアを試験区とし、12L12D（12 h 毎の照射・非照射）の間欠照射あるいは連続照射を対照区とした。なお、今回はこの両者の対比を行うことで、間欠照射の方が連続照射に比べて新鮮重が大となった、過去の予備結果も検証することを試みた。

3. 光源制御のアルゴリズム

Fig. 3は光源制御のフローチャートの概要を示す。1分毎にPCに記録された生体電位データより、現時点から過去の60分（1時間相当）を特定の分析区間長として、その区間データの回帰直線を求め、生体電位の傾きを計算した。その傾きをあらかじめ設定した閾値と比較し、閾値を越えてかつ傾きが正ならば照射、一方、傾きが負ならば非照射となるように光源を制御した。Fig. 4は具体的な光源制御の概念図を

示す。横軸は経過時間、縦第1軸は生体電位、縦第2軸は生体電位の傾きを示す。同図(a)の場合、計測開始から60分後には計60個の生体電位データが取得され、回帰直線による傾きの算出が可能な状態になる（同図中A点）。その後1分経過毎に、過去60分間の分析区間長の生体電位の傾きを算出し、以降これを繰り返す。そして、生体電位の傾きが任意に設定した正の閾値を下回る期間は、光源は非照射の状態を維持し、一方、上回った瞬間（同B点）に照射の状態に切り替えられる。その後、例えば同図(b)に示すように、生体リズムが下降して生体電位の傾きが負の閾値を超えた場合（同C点）には、光源は照射の状態から非照射の状態に切り替えられる。なお、実験開始から最初の60分間は傾きが求まらないので非照射の状態を維持するように設定した。

4. 閾値の設定

光源装置のON/OFFの閾値を試行的に 3.6 mVh^{-1} 、 2.4 mVh^{-1} 、 1.2 mVh^{-1} 、 0.6 mVh^{-1} の4種類に設定し、閾値より生体電位の傾きが大きい時には光源をON、小さい時にはOFFとなるように制御（この時には便宜的に閾値の前に+/-の記号を付記）した。また、予備的に閾値が 1.2 mVh^{-1} と 0.6 mVh^{-1} の2種類のみ、光源のON/OFFの制御を逆（閾値

図3 光源制御のフローチャート
Fig. 3 Flow chart of light control.

図4 光源制御の概念図
Fig. 4 A schematic diagram of light control.

の前に $-/+$ の記号を付記)として形態形成の比較も行った。

結果および考察

1. 形態形成の比較

Fig. 5 は実験の最終日 (14 日目) の代表的な生育結果を示す。上段に側面、下段に上面からの様子を示す。同図 (a) から (c) は LED パネルの ON/FF の閾値が 3.6 mVh^{-1} から 0.6 mVh^{-1} まで変化させ、いずれも生体電位の上昇で光源を ON としたマスタ側、一方、(d) から (f) は、(a) から (c) の条件下でのスレーブ側を示す。また、(g) と (h) は閾値が 0.6 mVh^{-1} において、生体電位下降で光源 ON となる場合のマスタ側とスレーブ側を示す。これらの結果より以下のことがわかる。

閾値 $+/-3.6 \text{ mVh}^{-1}$ から $+/-0.6 \text{ mVh}^{-1}$ では、閾値が小さくなるほど菌傘が展開し発達した形態となった。(a) $+/-3.6 \text{ mVh}^{-1}$ の場合は菌傘が未発達で樹状の形態となった。マスタ側とスレーブ側との形態形成を比較すると、わずかではあ

るがスレーブ側の菌傘が発達した形態となる傾向が観測された。さらに同一の閾値であっても生体電位下降で光源 ON となる逆の光源制御の場合でも、同図 (g) と (h) に示すように菌傘が大きく展開した形態となった。なお、同様な実験をのべ 3 回行った結果、いずれもほぼ同様な結果を示した。

ところで、生体電位の生体リズム変動に連動させない場合の青色 LED 光を用いた形態形成の代表的な実験結果を Fig. 6 に示す。同図 (a) は暗黒化、(b) は連続照射、(c) は 12L12D を示す。

図示のように暗黒下では生育不十分で、いわゆる樹状の形態となり、連続および 12L12D では子実体の発達が見られる形態を示している。さらに 12L12D においては、Fig. 5 で示した $1.2 \sim 0.6 \text{ mVh}^{-1}$ と比べても、ほぼ同様な形態形成となった。

2. 新鮮重の比較

Fig. 7 は、各光制御における試験区の新鮮重の比較を示す。条件毎に 3 個体の平均値を示し、各閾値の左側にマスタ側、右側にスレーブ側の結果を示す。また、対照区として連

続照射と 12L12D の結果も示した。閾値 $\pm 3.6 \sim \pm 0.6$ mVh^{-1} を比較すると、閾値の値が小さくなるほど新鮮重が大きくなる。なお、連続照射と 12L12D との比較では、過去の結果と同様に $^{21}\text{L12D}$ の方が新鮮重が大きくなる傾向を示した。また、これらの閾値においてマスタ側とスレーブ側とを比較すると、すべての閾値でスレーブ側では新鮮重が大となっていることがわかる。この理由については今後検討する予定であるが、特定の個体をバイオセンサとして他の個体の生育をコントロールすることが可能であることがわかった。さらに子実体の発達が見られた 2 つの閾値 ± 1.2 と ± 0.6

mVh^{-1} において、光照射タイミングが逆となる光源制御を試みた結果、 $-/+1.2 \text{ mV/h}$ の場合では $\pm 1.2 \text{ mVh}^{-1}$ よりも新鮮重が大きくなった。しかし、 $-/+0.6 \text{ mVh}^{-1}$ の場合では $\pm 0.6 \text{ mVh}^{-1}$ に比べて新鮮重が若干小さくなった。 $-/+$ のように、生体電位の上昇や下降に対応した光源の照射や非照射と形態形成との関係には一貫性がないが、これまでに茸の生育促進作用をもたらす技術として、光や温度などの外的刺激により子実体内部の生体電位を強制的に変動させて生育の活性化を図ることが有効であることを明らかにしている^{1,2)}。このことから類推し、今回のように生体電位の上昇

図 5 光源制御方法を変えた形態形成実験結果
Fig. 5 Typical morphogenetic properties under different light control.

図 6 生体リズム制御なしでの形態形成の比較
Fig. 6 Comparison of the morphogenesis without the biorhythm control.

/ 下降の区別に限定しなくても、単にリズム変動に連動した光照射や非照射を提示することで、子実体の発達を促す形態形成を呈したと考えられる。

また、 $\pm 1.2 \text{ mVh}^{-1}$ のスレーブ側、 $\pm 0.6 \text{ mVh}^{-1}$ と $\mp 1.2 \text{ mVh}^{-1}$ および $\mp 0.6 \text{ mVh}^{-1}$ のマスター側とスレーブ側の 7 種類の光刺激では新鮮重が約 1000 g となり、連続照射より重量が重く 12L12D の場合とほぼ類似した。この結果は、茸生育期間における総照射時間と関連すると考えられ、詳細は以下の 3. で述べる。

3. 光刺激タイミングと閾値の関係

Fig. 8 は実験期間 14 日間の生体電位変化とその傾き、および LED 点灯状況を示す。同図 (a) は Fig. 5 で示したように樹状の形態となった閾値 $\pm 3.6 \text{ mVh}^{-1}$ 、同図 (b) は形態形成および新鮮重ともに良好であった閾値 $\pm 1.2 \text{ mVh}^{-1}$ で栽培した結果を示す。これらの結果から以下のことがわかる。

同図 (a) に示すように、 $\pm 3.6 \text{ mVh}^{-1}$ では生体電位の傾きが閾値に達せず、長時間光源 ON 及び OFF 状態を保持している。ところで、これまで実施してきた約 350 個体のマイタケ子実体では、実験後半の栽培 7 日以降から生体電位変動は観測されるものの、変動が小さくなる傾向が確認されている。このような特性を踏まえると、8 日目 (192 時間) 以降では、傾きの閾値を大きく設定すると、今回の生体リズム制御では閾値に達することができず、光源制御が不適切であることが推定できる。これに対し、同図 (b) に示す $\pm 1.2 \text{ mVh}^{-1}$ の小さな閾値の設定では、生体電位の傾きは実験期間中には閾値に達しており、生体電位変動が小さくなる実験後半であっても光源制御が行われていたと推定できる。

また、Fig. 8 に示した実験期間中における、のべ 336 時

図 7 光刺激の閾値ごとの新鮮重の比較
Fig. 7 Relationship between various threshold levels and the weight of fruit body. (Bars indicate : mean $\pm$ SD)

間(14日間)のうち、光照射された総時間を求めると、(a) $\pm 3.6 \text{ mVh}^{-1}$ では光の照射は約 94 時間であり、これは実験期間中の照射比率に換算すると全体の約 28%に相当する。このことから暗状態で栽培した場合に観察される、いわゆる光量不足に起因する「樹状の形態」⁵⁾ になったと推定できる。

一方、(b) $\pm 1.2 \text{ mVh}^{-1}$ では実験期間中のうち、光の照射は約 165 時間となり、約 50%の照射比率に相当する。この比率は 12L12D と同一となる。Fig. 7 に示した新鮮重の比較結果では、ほぼ同様な重量であるが、Fig. 5 の (b) と (e) と Fig. 6 の (c) に示した形態を比較すると、生体リズム制御の方が 12L12D に比べて菌傘の展開が発達する傾向を示している。生産者からの聞き取り調査によれば、マイタケは菌傘が

良く展開し、かつ新鮮重の増大が見込まれる方が市場ニーズが高いと伺っている。したがって、今回提案した生体リズム連動制御による栽培技術は、12L12D に比べて菌傘の発達を促し、新鮮重はわずかながらも増加する傾向が見込まれ、本技術の有効性が示唆された。

今後は、より効果的な生長促進をもたらすような光強度や閾値などの設定条件などについても、更に検討を予定している。なお、本研究では、子実体の生体電位変動に着目した光源照射に対するバイオリズム制御が形態形成へ及ぼす影響のみに言及している。しかし、生産性の観点からは「色づき」や「味覚」などのカテゴリの定量評価も重要と考えているので、今後検討する予定でもある。

ところで、生体リズムに連動させた制御は、自然界や物理

(a) Case of $\pm 3.6 \text{ mV h}^{-1}$

(b) Case of $\pm 1.2 \text{ mV h}^{-1}$

図 8 生体電位変化と光源制御

Fig. 8 Changes in bio-electric potential and light control.

現象でもしばしば観測される「引き込み現象」⁷⁾に類似した作用を及ぼし、生長促進をもたらしたと考えられる。しかし、今回の実験結果と「引き込み現象」との関係については、現在は不明なので今後検討する予定である。

摘 要

本研究ではマイタケ子実体の生体電位信号をモニタリングし、信号中の概周期的な生体リズム成分より、光照射のタイミングを制御する方法を考案した。すなわち、子実体をバイオセンサとして用いることで、生体電位の自発性リズム変動に連動させた光照射を用いる新たな栽培技術を提案した。約1時間分析区間長毎の生体電位の上昇や下降の変動特性に応じて、光源装置の点灯あるいは消灯タイミングを試行的に設定した。その結果、12L12D(12時間Light, 12時間Dark)の間欠照射あるいは連続照射に比べて、生体電位のリズム変動に連動させた光源制御の方が菌傘の展開が発達したり、新鮮重が増加する傾向となり、茸工場内での生産性向上が見込まれる結果を得た。このように、本研究では特定の個体をバイオセンサとして生体電位信号のリズム変動を計測して、その信号に連動させて茸工場全体の光源を制御するシステムの基盤が構築できたと考えている。

なお、本研究成果の一部は文部科学省科学研究費(基盤研究(C):課題番号16560420)の助成による。

引用文献

- 1) 平間淳司, 柳橋秀幸, 松田真人, 石田 良, 宮本紀男. 光刺激による舞茸の子実体の生体電位反応と形態形成との関係. 電気学会論文誌 122-C(9): 1679-1685. 2002.
- 2) 柳橋秀幸, 平間淳司, 松田真人, 宮本紀男. 生体電位を指標としたマイタケの至適生育温度の探求および生長促進の試み. 125-E(4): 159-164. 2005.
- 3) 柳橋秀幸, 松田真人, 平間淳司, 宮本紀男, 西堀耕三, 大平安夫. 光刺激による茸(マイタケ)の生体電位反応(第4報)—子実体および培地内部のリズム変動特性—, 植物工場学会誌 16(4): 193-197. 2004.
- 4) 武者利光, 沢田康次, ゆらぎ・カオス・フラクタル. 日本評論社, 東京, 59-110. 1991.
- 5) Hirama J.. Relationship between the bio-electric potential and the morphogenetic properties of *Grifora frondosa* when subjected to different light stimuli. In: Proc. First Japan-Thailand Symposium on Advanced Technologies in Agricultural Production and Post-Production Operations. Thailand. 8-9 December, 89-94. 2003.
- 6) 松岡大輔, 柳橋秀幸, 平間淳司, 宮本紀男, 西堀耕三, 大平安夫. 光源制御を生体リズムに連動させたマイタケ栽培技術の提案. In: 農業環境工学関連7学会2006年合同大会, 講演要旨集CD. 札幌. 9月11日-15日. 2006.
- 7) 吉川研一. 非線形科学—分子集合体のリズムとカタチ—. 学会出版センター, 東京, 12-22. 1992