

ノート

北陸に適合した省エネルギー型植物栽培施設の開発

佐藤 正幸^{1,2*}・坂本 敏夫¹

¹金沢大学自然科学研究科生命科学専攻・²株式会社光植栽研究所

(2015年5月19日受付 2015年7月1日受理)

Development of an energy-saving cultivation system suitable for the Hokuriku Region

Masayuki Sato^{1,2*} and Toshio Sakamoto¹ (¹*Division of Life Science, Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University, Kakuma, Kanazawa 920-1192,* ²*Light & Plants Research Corp. Obishi 157, Komatsu 923-0314*) *Seibutsu-kogaku* **93**: 542–546, 2015.

We have developed an energy-saving horticulture facility inside a glass greenhouse. There is limited sunlight and low temperatures during the winter season. Thus, controlling light intensity and temperature inside the facility is important for maintaining a natural environment in the Hokuriku region. The temperature was monitored at the top of the greenhouse, and supplement lamps were turned on when the air temperature from the top of the greenhouse was below 20°C during the day. The light supplement system maintained the light intensity in the planting area at more than 150 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ regardless of the weather. On sunny days, the warmed air in the top of the greenhouse was circulated downward to the plantation area, and thermal storage units made of PET bottles were used to keep the hydroponic culture solution tank warm. The energy-saving air cooling system was constructed using a combination of water spray and an electric fan. A ventilation duct was used to drive the outside air. When the temperature inside the cultivation area exceeded 28°C, the cooling system was activated, and an electric fan pumped outside air into the plant cultivation area to maintain the temperature under 36°C. The systems maintained the temperature in the planting area at 5–36°C when the outside temperature was –5 to 20°C. Our results confirm this system is applicable to winter strawberry cultivation in the Hokuriku region and does not require air conditioning or fuel consumption for a heater.

[**Key words:** plant factory, sunlight, supplemental lightening, temperature control]

完全閉鎖型植物工場は栽培環境を任意に設定できる利点があるが、年間売上金額を超える投資を必要とする。また、ランニングコストとして光源用および空調用の消費電力負担も大きい。一方で太陽光利用型の植物工場は償却費負担や光源用消費電力での優位性があるものの、北陸地方では栽培環境が季節や天候によって大きく変動するため、やはり冷暖房や補光に多くのエネルギーの投入を必要とする。そこで、既存のガラス温室を利用して簡便な自動制御を付加し、光と温度を制御できる省エネルギー型栽培施設を構築することを研究目的とした。北陸地方の農業振興のためには、小規模事業者が投資可能

な範囲で、かつ冬期間にも低コストで栽培が可能な園芸施設を構築する技術開発が求められる。本研究では、北陸に適合させることを考慮して、制御条件の細部を設定し光熱費の節減を図るとともに、省力化できるように制御装置を自動化した。

金沢大学角間南キャンパス（北緯36°32'46"，東経136°42'35"）にあるガラス温室（床面積100 m²，軒高さ3 m，天井高さ5.9 m）の内部に、自動制御によって温度と光量を一定の範囲内に保つシステムを設置することとした。第一に必要最小限の補光光源を設置し、昼間の日照不足を検知して自動制御により点灯することにし

*連絡先 E-mail: st-madai@miracle.ocn.ne.jp

た。第二に冷暖房機器を使わない温度制御手法を考案した。補助光源からの発熱だけでなく、少ない日照により発生する暖気を利用して低温対策とした。その一方で、ガラス温室では、冬期であっても晴天日に45°C以上の高温となる。これを感知して作動する散水噴霧冷却装置および外気との換気装置を設置し高温対策とした。

太陽高度がもっとも低い冬至日の金沢市における快晴時の日照量は、太陽からの最大的光合成光子束密度 (PPFD) を $2000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ とすれば、午前8時で $280 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、正午には $800 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の光量が得られる計算になる。この計算値に近い値が実測値としても得られる。このことから、晴天であれば冬期であっても補光の必要がないことが分かる。曇天日 (雲量10) に施設内での光量 (PPFD) を実測すると、午前8時で $34 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、正午には $60 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ であった。蛍光灯を使った閉鎖型の栽培施設における光量は $150 \sim 200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ とされている^{1,2)}。曇天時に、自然光と人工光源からの補光を合わせて、植物に照射される光量が $150 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 程度となるように補光することとし、 $90 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の光量が得られるように光源を選択して設置場所を決めた。200型レフ電球RF110V180WH (NEC, 東京都) 1個を栽培棚1台ごとに培地の中央に設置し、昼光色相当の60型LEDランプLDR6DW6.4W (パナソニック, 大阪府) 2個を培地両端部の0.9 m上方に設置した。これらの補助光源からの光量の実測値は $85 \sim 120 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ であり、目的の光量が得られていることが分かった。

短日植物であるイチゴの栽培を前提として、曇天時の日中 (8:00~17:00) 9時間補光することとした。自然光が $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 以下となった場合に補助光源 (およそ $90 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) を作動させる制御が妥当である。しかしながら、光センサーを用いて光量 (PPFD) を実測し、補助光源を制御するシステムは、高価でかつ複雑なものとなり、一般の農業者には使いにくい。ガラス温室内の温度が日照により大きく変動することに着目し、簡便な代案を検討することにした。

ボタン型温度データロガーのサーモクロンGタイプと解析ソフトのThermomanager (KNラボラトリー, 大阪府) を使用して外気温と温室内部温度の推移を計測した。北陸の冬期では晴天の場合、最低気温-5°C、最高気温13.5°C、この時、ガラス温室内の温度は最低-3°Cから天井部での最高42.5°Cの範囲で大きく変動した。晴天時の温室内部は冬期であっても20°Cを超えることが分かった。これに対して降雪時には、最低気温-2.0°C、最高気温4°Cとなり気温の変動幅は小さくなった。この時のガラス温室内の温度は、外気温よりも高いが、最低

-0.5°Cから最高15°Cの範囲となり、20°Cには達しなかった。こうした温度計測を栽培期間にわたって継続し、ガラス温室内の天井部で温度変化が大きいこと、曇天時には天井部であっても20°Cには到達しないことが分かった。この経験則に基づいて、天井部の温度をモニターすることとし、日中 (8:00~17:00) に20°C以下になった場合に、補光光源を点灯する設定にした。

天井から床まで直径150 mmのアルミ箔製ダクトを設置し、地上3 mの高さに6インチで能力5.32CMMのブースターファン (Active Air, USA) を接続して、天井部に溜まっている暖気を栽培植物の近傍に還流した。ブースターファンによるダクト内の風速は 5 m s^{-1} である。プログラムタイマーPT50DW (リーベックス, 埼玉県) により日中の9時間8:00~17:00の間稼働させた。このダクト内の地上1 mの位置にサーモスタットEAC3L (八光商事, 長野県) のセンサーを設置した。ダクト内を流れる空気の温度が20°C以下の時に、リレーLY1A (オムロン製, 京都市) を経由して補光用光源を駆動した。このしくみにより、光量を直接測定することなしに日照不足を解消するための補光制御を可能とした。また、補助光源の上部を培地の高さまで、厚さ0.02 mmの透明ビニールで覆い、点灯時の発熱を利用して培地近傍を保温できるようにした。

換気制御を容易にするため、3.6 m × 3.6 mの区画に設置した6基のイチゴ栽培棚全体を床から高さ1.8 m位置から上方1 mを透明ビニールで覆い、下方に0.8 mの隙間を設けた内貼りで覆う方式にした。この内貼りで囲った空間 (およそ 13 m^3) に暖気をためる構造とした。天井部から暖気を取り入れるダクトに、ブースターファンに加えて、6インチで能力12.7CMMの送風ファン (Active Air, USA) を地上2 mの位置に設置した。これにより風速 12 m s^{-1} で送風できる。栽培区域の内貼り内部の空気を約60回 h^{-1} で換気する能力を有する。天井部から還流した暖気の温度が32°Cを越えた場合、栽培区域が高温になる。そこで、20~32°Cの温度範囲で送風ファンを駆動して天井部からの暖気を培地近傍に還流させ、32°C以上の場合は送風ファンを停止して暖気を天井部に留める設定とした。20°C以上と32°C以下の感知用として各々サーモスタットEAC3HとEAC3L (八光商事, 長野) のセンサーをダクト内に設置した。

水耕栽培用のタンク (容量およそ100 L) の近傍に、黒ビニールでカバーした容量500 mLのペットボトル31本に水 (総量15.5 L) を入れて設置し、さらに栽培棚下部のタンク回りに透明ビニールで覆いをつけた。この蓄熱槽を設置しなかった場合を対照区とし、タンク横の気温の変化を測定した。この結果、蓄熱槽を設置すること

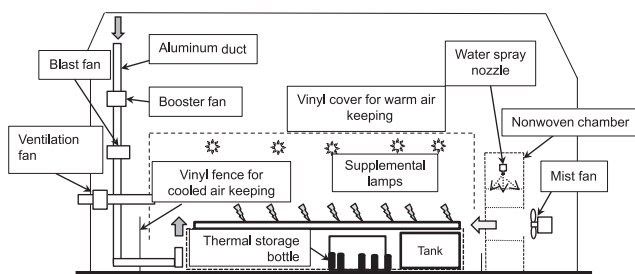


Fig. 1. Temperature control system. The warmed air in the top of the greenhouse is circulated downward to the plant cultivation area. Supplement lamps will turn on when the air temperature from the top of the greenhouse is below 20°C. When the temperature inside the cultivation area is over 28°C, a water spray system will automatically create a mist inside the chamber that is made of non-woven fabrics for the air-cooling system. The electric fan will simultaneously turn on to drive the chilled air into the plant cultivation area. When the temperature exceeds 32°C, the air circulation from the top of greenhouse downward will be stopped, and cool air outside of the greenhouse will be driven into the plant cultivation area.

により、高温抑制効果は認められなかったが、低温に対しては、蓄熱槽なしの対照区と比べて最低温度がおおよそ3°Cほど高く、低温抑制効果が認められた。

以上を組み合わせ、冬期であっても暖房機器を使わずに、栽培区域の温度を常に5°C以上に保つことができた。

冬期であっても快晴時には、ガラス温室内は最高45°Cまで上昇する。低温対策とともに冷却システムを必要とする。晴天時に培地近傍を冷却する方法として、散水噴霧冷房とパッドアンドファン冷房を組み合わせた装置を製作した。栽培区域の外部に不織布で囲った0.9 m × 1.5 m高さ1.8 mの空間内に散水噴霧ノズルを設置した。外部から径300 mmのファン（能力仕様値17CMM）を用いて送風し、蒸発潜熱を利用して冷却した空気を栽培区域内に送風する方式とした。サーモスタットEAC4L（八光商事、長野）のセンサーを栽培区域に設置し、温度が28°C以上の場合に、散水噴霧と送風を同時に動作させる設定とした。上水道の蛇口部に接続したノルマルクローズ型電磁弁AB31-AC100V（CKD、愛知県）を開口して水道水を散水噴霧ノズル（ガーデンクーラGCA12:株式会社タカギ、福岡県）から噴霧した。0.3 MPaの水圧での噴出水量は350 mL min⁻¹であった。栽培区域は3.6 m × 3.6 mの床面を高さ0.9 mのビニールフェンスで囲っており、この区域に冷気がたまる構造とした。不織布で囲った構造体の内部に散水噴霧することで水滴の飛散を防止し、植栽には水滴が直接かからない構造とした。

散水噴霧冷房では飽和水蒸気圧までの湿度上昇が冷房能力の限界を決定する。通常5～10°C程度の冷却が限

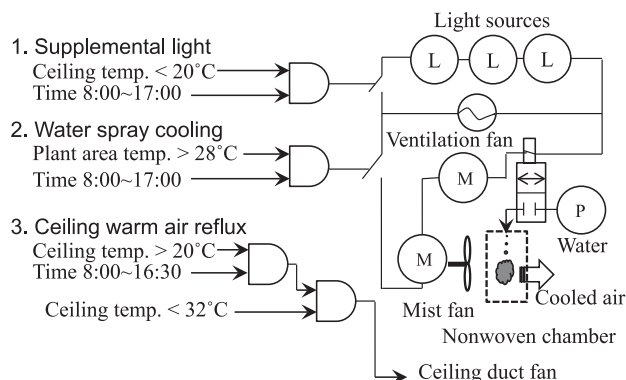


Fig. 2. Flow chart of light and temperature control system.

界となる。これ以上の冷却は換気を活用する必要がある。天井部から還流した暖気の温度が32°C以上の場合、天井暖気還流を停止すると同時に、ガラス温室の外から空気を培地近傍にファン（径300 mm、能力仕様値17CMM）を用いて流入させて換気し、外気によって冷却することとした。

Fig. 1に本装置の概略図を、Fig. 2にここまで述べてきた補助光源と温度制御のフローチャートを示す。制御用の機器の購入価はサーモスタット4個、電磁弁1個、リレー2個、送風ファン4個、アルミダクト4本、散水噴霧ノズル4セット、レフ型電球6個、LED電球12個および配線、ソケットなど総額約11万円である。

本栽培装置を用いてイチゴの栽培実験を行った。実験材料にはうどん粉病への耐性が高い品種「宝交早生」を用いた。ハダニ防除のためダニトロンフロアブル（日本農薬、東京）の1000倍希釈液に苗を浸漬後定植した。

温室内に3.6 m × 3.6 mのイチゴ栽培区域を設定し周囲を農耕用ビニールと木材で構成したフェンスで囲った。木材の枠組みは高さ1.8 mに設定し0.9 mの高さに横を設置した。これにより栽培区域の周囲を囲うビニールフェンスの高さを0.9 mと1.8 mの2段に設定可能とした。この栽培区域内に0.9 m × 1.5 m高さ0.9 mのアルミ製栽培棚を2段にして設置した。下段側栽培棚の上面に培地を置き、下部には水耕溶液用のタンク（容量110 L）を設置した。タンク内の液肥量は80から100 Lとした。タンクの周囲には、前述のように、黒ビニールでカバーしたペットボトルを蓄熱槽として設置した。この栽培棚を栽培区域内で長軸を南北方向に向けて2台 × 3列で計6台設置した。栽培棚1台には1000 × 150 × 75 mmの大きさの培地を2列並行においた。培地の材料は多孔質天然砂のゼオライト、ゼオフィル1424（新東北化学工業、宮城県）を使用した。水耕溶液タンクから培地への液肥の供給はハイポニカ製循環ポンプHHP-J-1

(協和株式会社, 大阪府) を使用した。液体肥料はハイポニカ製の二液混合タイプを使用し, $EC\ 1.3 \pm 0.3\ dSm^{-1}$ の濃度に設定した。ポンプはプログラムタイマーPT24 (リーベックス, 埼玉県) で作動時間を制御し, 8:00 ~ 17:00 の間に1時間ごとに15分間作動させ, 溢れた溶液は下部に設置したタンクに自然落下させる循環方式とした。

イチゴ栽培期間を通じて, 温室内外の温度, 本研究で開発したシステムにより自動制御したイチゴ栽培棚の温度の変化を測定した。冬期には外気温が最低 $-5^{\circ}C$ から最高 $20.0^{\circ}C$ まで変化し, このとき温室内の温度は外気温より高くなるものの, むしろ変動幅が大きくなり $0^{\circ}C$ から $41.5^{\circ}C$ まで変化した。本研究で開発したシステムによって, イチゴ栽培棚周辺の温度は平均 $12.2^{\circ}C$, 最低 $5^{\circ}C$ から最高 $36^{\circ}C$ の範囲内に保持することができた。Fig. 3 に2011年1月28日から2月8日まで実測したイチゴ栽培棚の温度変化を示す。

この施設を用いて10月上旬にイチゴ苗を定植し, 定植後37日にあたる11月下旬には花をつけ, 2月中旬までの累積開花数は1株あたりおよそ22, 4月中旬までに1株あたりおよそ132 gのイチゴ果実を収穫することができた。冬期の3か月間(12月1日~2月28日)の栽培実績に基づいて消費電力量を試算すると次のようになる。6台の栽培棚にそれぞれ補助光源(約200 W)を設置し635時間点灯した。補光の消費電力は762 kWhであった。換気ファン(60 W $\times$ 2)の作動時間は40時間, ダクトファン(20 W + 80 W)の作動時間は173時間で, これらを合計した消費電力は22 kWhであった。したがって3か月間の総電力消費量は784 kWh, 農事用電力の従量供給料金を11.52円/kWhとして料金は約9000円となる。本研究では, 50株のイチゴを栽培しているので, 1株あたりの電気料金としては厳冬期であったとしても月額60円となる。また, イチゴ果実の売上を1株あたり約1000円とすると, 電力費の売上高比率は18%と試算される。

このようにして北陸の自然環境に適合した省エネルギー型の自動制御付き栽培施設を構築し, 実際に4年間にわたりイチゴの栽培試験を実施した。本栽培施設を用いて, 私どもはさらに研究を進め, 減農薬化を図るために単色光照射を利用した「光防除技術」および収量を増加させるための光照射方法の開発を実施した(佐藤正幸, 坂本敏夫 未発表)。これらの研究の成果については, 別の論文として発表準備中である。

本栽培施設の制御システムは, 作動の信頼度が高く, 4年間の栽培実績で補光光源ランプの球切れが2回あったが, 温度制御の基本的な部品については故障がなかつ

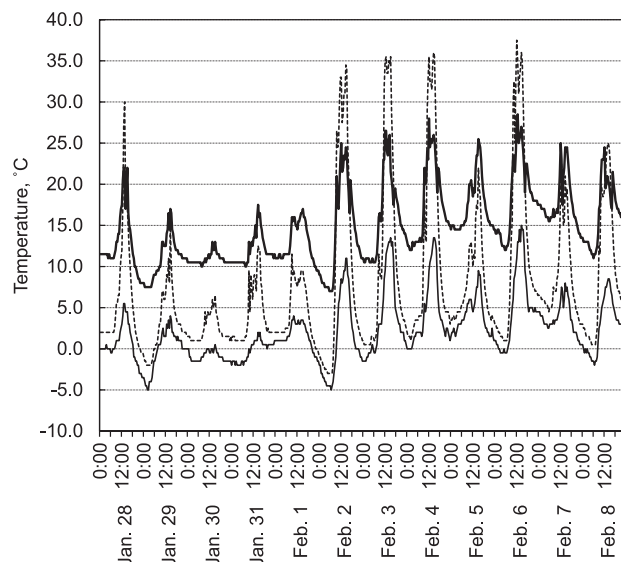


Fig. 3. Temperature changes in the greenhouse interior, outside, and in the plant cultivation area from January 28–February 8, 2011. The thin line indicates the outside temperature, and the dotted line indicates the temperature 1 m above the floor of the greenhouse. The thick line indicates the temperature recorded in the plant cultivation area. The supplement lamps were turned on from January 29 to February 1 to keep the plant cultivation area warm.

た。また, 自動装置として十分に実用的であり, 日常的な点検・調整・保守作業を必要としない。一般農業者でも採用できるレベルのメンテナンスフリー条件は整っていると考える。

本研究では, 既存のガラス温室を利用して冷暖房機器を使わずに, 低コストで光と温度を制御し, 北陸に適合した栽培施設を構築する, という当初目的を達成することができた。本研究で考案したいくつかの制御技術は, 北陸地方の農業振興に役立つのみならず, 園芸施設の改善, 特に省エネルギー化による収益性の改善に役立つものと考えている。本研究で開発したシステムには, 次の2項目について, さらに改善の余地がある。今後の研究開発により検証を必要とするが, これらの改善により $30^{\circ}C$ 以上の高温の頻度を下げ, $10^{\circ}C$ 未満の低温の頻度を下げることにより, 栽培区域の温度の変動幅をより小さくできると考える。

第一は培地近傍での換気制御の改善である。外気をフェンスで囲った栽培区域の中に強制的に送風して流入させ, 栽培区域の暖気を押し出すように流出させる設計にしたが, これでは培地近傍の気温は期待したほど低下しなかった。栽培区域内へ送風した冷気の大部分は, そのまま内貼り下部から流出した可能性がある。この問題点は, 高温になった空気を栽培区域の上部に設けた流出口から排気する構造とし, 栽培区域の換気と熱交換を改

善することによって解決できる。

第二に北側壁への蓄熱槽の設置である。温室は伝統的に東西南北の壁と屋根を透明なガラスまたはビニールで構成している。このうち北側の壁は光の取込みに効果がないだけでなく、熱貫流率が高く温室内の温熱を外部へ逃がしてしまうため、むしろ損失を与えている。この問題点は、水を充填したタンクを蓄熱槽として北側壁に設置することで改善できる。この蓄熱槽への日射量は太陽高度が低い冬期ほど大きくなるため、温室内の保温には有利となる。厳冬期であっても晴天日には水温30°C近くまで上昇すると試算される。また、夜間の温度低下を緩和する効果も期待できる。

要 約

日本の農業の振興のためには、一般の農業者が導入可能な安価で堅牢な自動制御を付加した園芸施設の構築が必要である。特に北陸の冬期の日照不足に適合させるためには補光対策が不可欠である。筆者たちは最小限度の補光を実施するが、冷暖房を使わずに温度と光の環境を自動制御する省エネルギー型の植物栽培施設をガラス温

室内に構築した。この施設を用いて、日照が限られている北陸地方の冬期にイチゴを栽培できることを示した。本施設は、冷暖房装置を用いていないため、導入コストが低いだけでなく、ランニングコストも低いという特徴をもつ。今後、さらなる改良に継続して取り組み、温度制御の性能を向上して実用性を高めることができると考える。

謝 辞

本論文の作成にあたり助言を頂いた松郷誠一教授（金沢大学）に感謝いたします。株式会社小松製作所（東京都）から奨学寄附金をご提供頂き、研究経費の一部といたしました。

文 献

- 1) 彦坂昌子, 吉田英生, 吉野千里, 後藤英司: 青色光および明期が四季成り性イチゴの開花に及ぼす影響, 日本生物環境工学会京都大会講演要旨集, 8-9 (2010).
- 2) 栃木菜穂美, 彦坂昌子, 後藤英司: LED補光の光強度がトマトの果実成長および補光葉のクロロフィル濃度に及ぼす影響, 日本生物環境工学会高松大会講演要旨集, 14-15 (2013).