

## 閉鎖型温室・閉鎖型太陽光植物工場の可能性と課題

誌名	農業および園芸 = Agriculture and horticulture
ISSN	03695247
著者名	古在, 豊樹 岩崎, 泰永 後藤, 英司 関山, 哲雄 丸尾, 達 中野, 明正
発行元	養賢堂
巻/号	91巻12号
巻号補足	
掲載ページ	p. 1204-1214
発行年月	2016年12月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター  
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council  
Secretariat



## 閉鎖型温室・閉鎖型太陽光植物工場の可能性と課題

古在豊樹<sup>1</sup>・岩崎泰永<sup>2</sup>・後藤英司<sup>3</sup>  
 ・関山哲雄<sup>4</sup>・丸尾 達<sup>5</sup>・中野明正<sup>6</sup>

【キーワード】：閉鎖型温室，閉鎖型太陽光植物工場

## 1. はじめに

比較的高度な環境制御装置を備えた「閉鎖型温室 (closed greenhouse, 閉鎖グリーンハウス)」あるいは「閉鎖型太陽光植物工場 (closed plant factory with solar light)」で商業的に大規模な生産販売を行なっている例は、筆者らの知る限り、2016年現在、世界のどこにも見あたらない。本稿では、この閉鎖型温室の開発と実用化を日本で試みることの意義と必要性および技術開発の課題などについて述べる。

閉鎖型温室は、1990年代から2000年初めにかけて、オランダでかなりの研究開発がなされた (De Gelder et al. 2012)。その特徴は1年サイクルの長期蓄放熱にある。すなわち、夏期は閉鎖型温室の余熱を地下の帯水層 (Aquifer) に蓄熱し (温室冷房)、冬期は暖房熱源としてその熱を取り出す (温室暖房)。実用規模の試験的トマト生産が行なわれ、20%の収量増と30%の暖房費節減がなされたが、運営コスト高や室内の多湿・乾燥による病気発生などにより、結局、普及に至っていないとされている。閉鎖型温室の研究は、同時期に、スウェーデン、ドイツ、トルコ、カナダ、フィンランドなどでも行われた (Biernatzki and Meinecke 2014)。オランダなどでの閉鎖型温室プロジェクトに関する上述の総説などを踏まえて、本稿では、長期蓄熱に関しては検討課題としていない。

閉鎖型温室に対する日本での関心は、要約すれば、①温室構造の単純化と耐風性の向上、②環境制御の高度化による収量・品質の向上および③病虫害作業時間軽減に対する期待にある。一方で、多くの解決

すべき問題点がある。それらの両面について本稿で述べる。

本稿における「閉鎖型」は「換気をしない (換気装置が無い、あるいは、たとえ換気装置があっても非常時以外は作動させない)」ことを意味する。「太陽光」は主光源が太陽光であることを意味し、人工光源で補光をする場合を含む。「植物工場」は「比較的高度に環境制御された植物生産施設」を意味する。以下では、「閉鎖型温室」と「閉鎖型太陽光植物工場」を合わせて、「閉鎖型温室」と略称する。単に、「温室 (greenhouse)」または「一般的な温室」と呼んだ場合は、自然換気用窓または強制換気装置を備えた園芸施設を意味する。閉鎖型温室は養液栽培を必須としているわけではない。しかし、閉鎖型温室では、一般の温室よりも高度な地上部環境の制御を行うことになるので、地下部環境の制御性を高めるために、養液栽培を選択するのが一般的であろう。

なお、本稿は、植物工場研究会 (特定非営利活動法人) に設置された閉鎖型太陽光植物工場調査研究委員会 (岩崎泰永委員長、農研機構) における活動の成果の1部である。

## 2. 気候的背景

東南アジア、中南米などにおける亜熱帯・熱帯地域、中国の沿岸部、日本・韓国などにおける中緯度地域、および中近東や中国内陸部などにおける乾燥地域においては、簡易な温室の数が多い一方で、オランダ式の高度な環境調節装置を備えた高軒高で大規模な温室の面積が増加している。

これらの地域の温室では、冬期においても昼間に晴天であれば、室温を25℃程度の適正值に維持するためには換気が必要である。他方、夏期では換気窓を終日にわたり全開するのが通常であり、晴天昼間では換気窓全開でも室温が30℃以上になる地域が少なくない。

<sup>1</sup> 千葉大学名誉教授・植物工場研究会 (Toyoki Kozai)

<sup>2</sup> (国法) 農研機構野菜花き研究部門 (Yasunaga Iwasaki)

<sup>3</sup> 千葉大学園芸学研究所 (Eiji Goto)

<sup>4</sup> 植物工場研究会 (非営利特定活動法人 (Tetsuo Sekiyama)

<sup>5</sup> 千葉大学園芸学研究所 (Toru Maruo)

<sup>6</sup> (国法) 農研機構野菜花き研究部門 (Akimasa Nakano)



亜熱帯・熱帯地域では室内外空気の水蒸気分圧差が比較的小さいので、気化冷房（蒸発冷却）は室温低下にそれほど効果的ではないことが多い。他方、乾燥地域では気化冷房が室温低下に効果的である。この気化冷房は、水を蒸発させることで室温を低下させるための必要水量が多い。ところが、乾燥地域では一般に水不足のため、かん水や気化冷房に必要な水量と水質の確保が困難またはコスト高になる。なお、一般的に露地で行われる畝間かん水やハウス内での散水によるかん水など土耕栽培では地面からの蒸発が多いので、点滴かん水や養液栽培により、かん水量を節減することが望ましい。

乾燥地域では、地下水の塩類濃度が高いことが多く、逆浸透膜装置等を用いてある程度の淡水化処理をしないと気化冷却やかん水用に利用できない場合が多い。海水を淡水化して気化冷房やかん水に利用することもある。また、鉄分を多く含む地下水の場合は、曝気して鉄分を固化沈殿させる必要がある。さらに、パッド・アンド・ファン装置では、その初期コストが高いことに加えて、換気ファンの運転にかなりの電力量が必要になる。また、気化冷却の蒸発面（パッド）に析出した塩類を高圧水噴射洗浄機などで除去する必要がある。上述のいずれの対策にも初期費用と運転費用が発生する。

### 3) 虫害・病害

換気（外気導入）に伴い、害虫や塵埃が室内に侵入しやすい。害虫侵入を抑制するために防虫ネットを設置すると、換気が抑制されて室温が高くなる。乾燥地では、屋外の害虫密度は比較的低いが、いったん温室に害虫が侵入すると繁殖しやすい。なお、井戸水を使う場合は、塩素系の薬剤での前処理やUV殺菌がないと、青枯病やピシウムによる根腐れを発生する場合がある。特に、高温の場合は、これらの病害は発生しやすい。

### 4) CO<sub>2</sub>濃度

換気窓を閉じている昼間の温室内 CO<sub>2</sub> 施用濃度は 700 ppm 程度に維持するが一般である。ところが、このような CO<sub>2</sub> 施用を行える換気していない時間帯は、前述のように、冬期でも晴天では朝夕だけで、夏期は皆無である。

他方、窓開放時における温室内 CO<sub>2</sub> 濃度は、晴天で葉面積指数が 3 前後であれば、外気のそれ（400 ppm）より 100 ppm 以上低くなるのが一般的であり、

特に群落内での CO<sub>2</sub> 低下は著しい場合があり、この低 CO<sub>2</sub> 濃度は植物の光合成をかなり抑制する。そこで、換気窓開放時に、室内 CO<sub>2</sub> 濃度を外気並みに維持して光合成を促進する方法として、ゼロ濃度差 CO<sub>2</sub> 施用法が推奨されている（古在ら 2014a,b）。この方法でトマトの収量は 20%程度増大されると言われている（古在ら 2014b）。

### 5) 耐風性と建設コスト

換気には十分な面積の開口部（換気窓）が必要である。また、天窓・軒高を高くすると、一般に、換気が促進されやすいと言われる。他方、天窓開口部大きくする、または地面から高い位置に換気窓を設置すると、台風、季節風、突風などによる強風時には、換気窓の破損に起因する温室構造の破壊が生じやすい。風速は地面からの垂直距離が大であるほど大となるからである。他方、耐風性を増すために温室構造を強化すると、コスト高となり、また、冬期や曇雨天時の採光性が低下する。

### 6) 環境制御システム

換気をすると、室内の気温だけでなく、飽差、CO<sub>2</sub> 濃度、気流速度が複合的に変動する。この変動の程度は、外気の風向、風速および換気窓の開度で大きく異なる。したがって、換気しながらの環境要因全般の好適な制御はかなり難しいと言える。

中緯度地域・乾燥地域の冬期では、晴天の昼間は換気が必要だが、その日の夜間には気温が 10℃以下に低下し暖房が必要ことが多い。つまり、昼間には換気で室内の熱エネルギーを屋外に捨てる一方で、夜間には石油系燃料で暖房するという無駄をしている。

## 4. 閉鎖型温室の利点

閉鎖型温室の短所あるいは課題は後で議論することにして、以下では、その一般的な利点について述べる。その利点のいくつかは、上述の「3. 一般的な温室に関する問題点」の解決に関係している。なお、以下では、閉鎖型温室では、暖冷房・除湿にはヒートポンプ利用を前提とするが、安価な温冷熱源が豊富にあれば、それを利用するのが得策である。

### 1) かん水に必要な水量

植物体から蒸散した水蒸気の室外への漏出がほぼ抑制できるので、蒸散水の 90%程度をヒートポンプによる除湿および冷房により結露水として回収

ができる。その結果、正味のかん水必要量は通常の温室に比較して、10%程度になる。

## 2) 虫害・病害

換気窓が無いので、換気窓からの害虫や塵埃の侵入を阻止できる。そのため、病虫害リスクが軽減する。また換気窓への防虫ネットの設置が不要になるので、防虫ネットとそのコストが不要となる。

## 3) CO<sub>2</sub>濃度

適温に管理されている閉鎖型温室では、年間を通じて、昼間の室内 CO<sub>2</sub> 濃度を外気の 400 ppm より 500 ppm 前後高めて 900 ppm 程度にすることができるので、光合成を大幅に促進することができる。これにより、亜熱帯、熱帯、乾燥地域のトマトの年間収量をオランダ並みの 70~80 kg/m<sup>2</sup> 以上、すなわち日本での慣行栽培によるトマト収量の3倍前後にすることが可能になる（ただし果実の糖度は3~5程度）。

トマトの最大収量はその土地の年間の積算光合成有効束密度（PAR 束密度、波長：400-700 nm）にほぼ比例すると考えられるので、環境制御と栽培管理を適切に行えば、年間積算 PAR 束密度がオランダのそれ以上である日本などの地域では、収量もオランダ以上になり得る。

換気窓を閉じた通常の温室の換気回数は0.3-0.5/h程度であるが、閉鎖型温室では換気回数を0.02回/h前後にできる。したがって、閉鎖型では換気回数に

比例する CO<sub>2</sub> 施用時の外気への CO<sub>2</sub> 流出速度を一般温室と比較して 1/10 以下に抑制できる（図 2）。

なお、熱エネルギーの出入りは換気窓の隙間などだけでなく、被覆材を含めた壁面全体でなされるので、換気回数 0.3-0.5/h の範囲では暖冷房負荷はそれほど影響されない。

## 4) 建設工期と工事費の節減

換気窓が無いので、閉鎖型温室は耐風性が向上し、強風時における屋根構造の物理的損壊が生じにくい。また、耐風性が高い温室形態・構造を設計しやすい。閉鎖型温室の骨組み構造は換気窓のある温室に比較して単純なので、建設工期の短縮および部材費と工事費の節減を図りやすい。さらに、壁面を通じての熱および物質の出入りに関する負荷計算が温室に比べて容易なので、その面での設計も比較的容易になる。

## 5) 環境制御システム

### (1) ヒートポンプ

閉鎖型温室の冷房による過高温抑制にはヒートポンプの利用が一般的である。ただし、冷水・冷熱が低コストで豊富に利用できる場合は、ヒートポンプを利用しない選択もあり得る。他方、ヒートポンプは暖房、除湿にも利用できるので、通年利用が可能である。

日本のように毎月の電気料金が、年間の最大消費電力で決まる基本料金と毎月の消費電力量となる

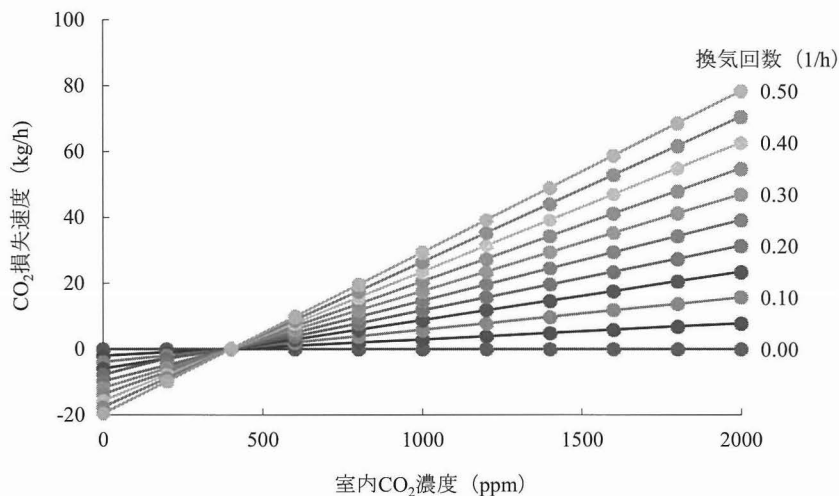


図 2 CO<sub>2</sub> 施用時における室内 CO<sub>2</sub> 濃度と換気回数が屋外への CO<sub>2</sub> 損失速度に及ぼす影響  
外気濃度 400 ppm, 床面積 1,000 m<sup>2</sup>, 空気容積 5000 m<sup>3</sup> と仮定。  
坂口俊輔氏作成。

電力消費量料金の合計となる料金体系の国では、ヒートポンプを冷房・除湿だけでなく、暖房にも利用した方が消費電力量あたりの年間の電気料金は割安になる。冬期の暖房だけに利用しても基本料金は12カ月分を支払うことになるからである。

## (2) 飽差

ヒートポンプによる冷房・除湿と細霧発生装置による加湿により、飽差制御が容易になる。冷房は通常は除湿をとまなうので、冷房時は飽差が大きく(相対湿度が低く)なりやすい。これは、多湿にもなう病気の発生の予防などに効果的である。低温期の冷房時には室外機(凝縮器)からの排熱を室内に戻す工夫をすれば、室温の低下を伴わずに飽差を大とすることができる。飽差を大きくすることは植物の葉からの蒸散あるいは根からの水分吸収を促進することになる。

細霧発生により室内空気の顕熱を潜熱に変換することで、短時間で気温低下と飽差減少が可能である。また、定植直後などの葉面積指数が少ない時期は、細霧発生により飽差の減少(と室温低下)による苗のしおれの抑制が可能である。

## (3) ヒートポンプの成績係数(COP)

ヒートポンプは、冬期の暖房以外に、夏期夜間の冷房に効果的に利用できる。この時は、室内外気温差が5°C程度なので冷房時COP(成績係数、消費電力量に対する冷房熱量の比)が5前後と高い。さらに冬期の昼間快晴時で室温が25°C前後で外気温が5-20°Cのとき、ヒートポンプの冷房時COPは5-10となる(古在 2009)。ただし、冬期の冷房に対応して、室温が外気温より低くても正常に冷房できるヒートポンプ機器の選定が必要である。

## (4) 冷房負荷と冷房コスト

晴天時昼間の閉鎖型温室の冷房コストは、対象作物の栽培に必要な室内に透過する日射束密度(波長:350-2500 nm, 単位:  $W/m^2$  (床面積))に大きく影響される。二次的には、昼間の設定室温および被覆材の長波放射透過率などに影響される。室内日射束密度が大であるほど、また被覆材の長波放射透過率が低いほど昼間の冷房負荷が大となるので、冷房コストが大となる。与えられた室内日射束密度の昼間晴天の条件下では、外気温と室温の差が大であるほど冷房負荷は大きく、その差が小であるほど冷房負荷は小となる。

以上の議論から、透過日射束密度の要求度がトマトなどに比較してそれほど高くないイチゴ、花き類、葉菜類などは閉鎖型温室の実用性は現在でもかなり高いと期待できる。それらで実用性を確かめた後に、トマトなどの果菜類に進むのが順当な手順とも言える。

## (5) 室内気流

換気窓からの外気侵入が無く、換気窓付近の局所的環境変化が軽減されるので、一般の温室に比較して、室内の気流パターンが比較的単純化され、また、その気温制御も単純化される。そして、室内の気流制御の自由度が高くなる。

また、閉鎖型温室では、局所的環境変動の軽減、害虫侵入・病害の低減の効果により、収穫等の予測が温室に比較して容易となる。病気発生や生育不良を防ぐには、閉鎖型温室内環境の季節変化・日変化パターンなどが一般の温室のそれらとかなり異なることおよび昼間のCO<sub>2</sub>濃度が高くなることを理解して対応する必要がある(De Gelder 2012)。

## (6) 農薬散布および衛生管理

壁面の隙間や換気口から侵入する害虫および塵埃がないので、人間や物品の出入り口の管理を徹底すれば、農薬散布および病虫害による収量・品質の低下を相当程度に減らすことができると期待される。現状の園芸施設においても露地に比較して、付着微生物が低減しているが、閉鎖型温室ではよりいっそうの低減が図られるとともに、衛生微生物の管理も容易になると考えられる。

## (7) 陽圧管理

閉鎖型温室の換気回数が毎時0.02回で前後あれば、最小限の暖冷房コストの増加で室内空気圧を外気圧よりも10 Pa(パスカル)前後高く維持する「陽圧管理」が容易である。陽圧管理により、出入り口などを通しての外気からの微小な害虫や塵埃の侵入を防止できる。また、閉鎖型温室の耐風性が増すことが期待される。ただし、室内を陽圧に維持するための給気には微細空気フィルターで清浄化され、かつ温度調整された空気を用いる必要がある。ただし、陽圧下では施用したCO<sub>2</sub>の室外への流出量がやや増える。以上を勘案して、陽圧管理は必要または効果的な時間帯だけ実施することになろう。

## (8) 温室の軒高と対象植物

オランダをはじめ多くの国々におけるトマトな

どの果菜類の高架（ハイワイヤ）栽培では高軒高温温室は不可欠である。ところが、実際には、草丈 100-200 cm 程度の作物（多くの花き類）や草丈 50 cm 以下のイチゴの栽培にも高軒高温温室が利用されていることが多い。さらには、草丈 30 cm 以下の各種の苗やレタスなどの葉菜類の栽培にも高軒高温温室が利用されている。

高軒高とする理由は、室内外の温度差換気を促進することおよび室内の温湿度環境の空間的・時間的変動の緩和（バッファ機能）とされている。加えて、室内の屋根近くの気温が床面や作物付近の気温に比較して高いのは、床面・作物付近の高温空気が上昇して屋根面付近に滞留するからと言われている。しかし、その説明が合理性を欠くのではないかとの見解が示されている（古在・関山 2016）。なお、本稿で述べている閉鎖型温室は、軒高の高低とは無関係に成立する議論である。

イチゴはトマトに比較して低い PAR 束密度（波長：400-700 nm）で栽培が可能である。また、温室の軒高が 3 m 前後と低くても栽培には支障がない。したがって、地上部環境が適正に制御されるのであれば、初期設備費、冷暖房コストともに低軒高温温室の方が低くなる。すなわち、閉鎖型温室でイチゴを栽培するのであれば、必ずしも高軒高とする必要はないと考えられる。なお、多くの場合、苗生産において必要とされる光合成有効光量子束密度（PPFD）はイチゴ栽培に比較してさらに低いので、太陽光を利用する意味が薄れ、人工光を利用した閉鎖型施設の方が合理的な場合が多い（古在 2009）。

## 5. 冷房負荷の抑制方法

上述のように、閉鎖型温室では必要十分な PAR 束密度を維持しつつも、冷房負荷を可能な限り軽減することが冷房コストを抑制する上で必要である。現状では、閉鎖型温室の最大の短所は、夏季昼間の冷房負荷が大きいことおよび晴天時に冷房装置が停止した時の室内過高温である。冷房負荷軽減に関しては、日射エネルギー（波長：350-2500 nm）のうち、閉鎖型温室の被覆材の PAR 透過率を最大にしつつ、他方では近赤外放射（波長：800-1500 nm）および赤外放射（波長：1500-2500 nm）の反射率を最小にすることが重要である。そのためには以下の方法が効果的である。

### 1) 近赤外放射反射フィルム

日射に含まれる近赤外放射および赤外放射を室外に反射する被覆フィルムを使用する。これらの放射を被覆面で吸収させるよりも、反射させた方が室温上昇抑止に効果的である。吸収させた場合は、それに伴う室温上昇を抑制するために、吸収された熱を合理的に屋外に逃がす処置を行う必要がある。

### 2) 植被受光率の向上による潜熱変換率の向上

被覆面を透過した PAR は可能な限り植被に吸収させて、光合成に有効利用する。床面積に対する通路面積の割合が小さい可動式ベンチを利用した高密度植栽培システムは上述の意味でも、また収量を増やす意味でも有利である（例えば、岩崎ら、2012）。なお、水分不足でない植物に吸収された PAR エネルギーの約 50% は蒸散にともない潜熱（水蒸気）に変換されるので、顕熱による気温上昇度が約 50% 抑制される。乾いた床、構造物などに PAR が吸収されるとその 100% が顕熱に変換され、室温上昇の大きな原因になる。

室内に透過した PAR が植被に吸収されずに構造物や床面に吸収されるのは、冷房時には、無駄に冷房負荷を増大させることになることに留意すべきである。

### 3) 構造物の日射反射率向上

被覆面および室内構造物などの PAR 反射率を高くし、構造物の温度上昇を抑制する（古在・関山 2016）。これにより、室内上部空間の気温上昇が抑制されるだけでなく、冬期における植被上の PAR 束密度が多少は上昇することになる。

### 4) 設定室温の変更

閉鎖型温室内の最高設定室温を晴天昼間時に通常（25-28℃）より高め（例えば 32℃程度）にすることによって冷房負荷を少なくする。正味光合成速度が最大となる気温は、CO<sub>2</sub>濃度が高くなると高温側にシフトするからである。ただし、最高気温は、雌蕊（しずい）、雄蕊（ゆうずい）にダメージを与える温度以下にする必要がある。

他方、作物の生育速度（葉や果房の分化速度）は有効積算気温が高いほど大となるので、生育速度を抑制するためには夜間冷房を行なって有効積算気温を低下させることが必要である。この場合、ヒートポンプによる冷房は有効である。

### 5) 局所冷房・冷却と気流制御

植物体の近傍や一部分のみを冷房・冷却する方法の効果が多くの品目で実証されている。この場合、温室全体を冷房する場合と比較して電気消費量が1/10以下となり得る。培地を20℃前後に冷却することで高温期のイチゴなどの生育促進や花芽分化促進に効果がある(岩崎 2007, Iwasaki 2008)。

イチゴの地際の短縮茎に相当する部分(クラウン)をプラスチック製のチューブに接触させて、チューブ内に20℃の冷水を循環させることで、生育、花芽分化、果実肥大を促進できる(壇ら 2015)。一般に、花(めしべや花粉)は高温によるダメージを受けやすいので、冷風を花房近傍にダクトで送る技術も開発されている(河崎・安 2015)。

作物の生育は実際は気温ではなく、作物体の温度の影響を受けるので、作物周囲の気流を制御することによって蒸散を促進して作物体温を低下させたり、作物の周辺に冷水や冷風を流すことによって植物体温を好適な範囲に維持することが求められる。

## 6. 暖冷房負荷, 初期コストおよび 運転コストの算定

閉鎖型温室で暖冷房・除湿にヒートポンプを利用する場合の設計に際しては、通年にわたる1日あたりの冷房負荷および暖房負荷、さらには夏期昼間の最大冷房負荷と冬期夜間の最大暖房負荷の算定が重要である。また、最大冷房負荷に見合ったヒートポンプ装置の選定とその運転コストの算定が必要となる。

最大冷房負荷が最大暖房負荷より大である場合は最大冷房負荷で年間の基本料金が決まる。その際の年間最大消費電力を低下させるために、大規模な閉鎖型温室であれば、吸収式冷凍機の導入を検討する余地がある。さらに、場合によっては、半地下式の閉鎖型温室に関する冷暖房負荷、日射透過率、耐風性などの検討が必要となり得る。

冷房負荷の算定には、大略、以下の係数値が必要となる。施設の寸法、屋外日射束密度、被覆フィルムの日射、近赤外放射、赤外放射の透過率と反射率、温室構造を含めた施設全体の日射透過率、被覆材(フィルム)の熱貫流係数、換気回数、床面の熱貫流フラックス、設定室温、設定外気温、透過日射の室内での顕熱・潜熱への変換比など。冷房設計外気温として15-20年に一度の極端な高温を選択すると、

過大な冷房能力のヒートポンプシステムとなるので、極端な高温時は一時的な遮光などによる冷房負荷軽減を選択するべきである。

## 7. 解決すべき技術的個別課題

上述の議論を踏まえると、今後解決すべき課題としては、以下の事項が考えられる。

### 1) 温室構造

(1) 閉鎖型温室の利点を活かした無窓の建屋骨組み構造・構造材の開発。

(2) 耐風性、作業効率を考慮した、閉鎖型温室に適した被覆材(フィルム)の展張・固定方法の開発。

(3) 晴天昼間における閉鎖型温室の上部空間の過高温を抑制するための温室構造および日射反射率・断熱・遮熱性能が高い構造材・塗料の開発(古在・関山 2016)。

(4) 室内環境が均一化しやすい温室構造および環境制御機器の選択と配置の開発

### 2) 被覆材

(1) 近赤外放射(波長 800-1500 nm)の反射率が80%以上で光合成有効放射(PAR)の透過率は90-95%のフィルムの開発と利用。

(2) PARの透過率が90%以上で、熱貫流係数が1-2 W/m<sup>2</sup>/°Cの断熱中空二重フィルムの開発。

(3) 構造材等による直達日射の影を減らすための、PAR透過率が95%以上、PAR拡散率が50%以上のフィルムの開発。

(4) 湿度管理が容易となる遮光用または保温用の透湿性フィルムの開発と適用。

### 3) ヒートポンプ利用システム

(1) 水-空気ヒートポンプと蓄熱槽・放熱槽・温冷水製造設置を組み合わせたシステムの検討。

(2) 空気-空気ヒートポンプの冷房時における室外の凝縮器からの排熱を利用した農産物や木材の乾燥あるいは温水(30-40℃)製造への利用。

(3) ヒートポンプまたは地下水で冷温水を作成し、蓄熱槽で直接熱交換した空気冷暖房する地中蓄熱・蓄冷熱槽式空調システムの開発。この場合、停電時でも熱交換ファンだけである程度の室温が維持され得る。

(4) ヒートポンプによる冷房・除湿時に蒸発器に生じる結露水のかん水への利用。デシカント除湿・空調、吸収冷凍機の利用の慎重な検討。

(5) 夏季夜間冷房時期における冷房負荷軽減のための、床面断熱または床面蒸発促進による、床土壌蓄熱の抑制（古在ら 1985, 古在ら 1986, 関山・玉城 2015）。

(6) 透過日射の作物による受光率を高め、透過日射エネルギーの 50%前後を潜熱に変換することで、気温上昇を抑制する。顕熱負荷に対する潜熱負荷の割合が増えると、ヒートポンプの COP が向上し得る。

(7) 年間の平均 COP を高く維持するための、暖冷房負荷に応じた、ヒートポンプ稼働台数の制御法の開発、およびヒートポンプの冷暖房能力選定法の開発（関山・古在 2015, 関山・古在 2016）。

(8) 蒸散速度制御を目的とした飽差制御、および病害抑制・作物徒長抑制を目的としたヒートポンプ利用の湿度制御。閉鎖型温室では一般の温室の昼間の換気時に比較して、飽差が小さくなる場合が多いことを踏まえた環境制御、栽培管理、病虫害管理の方法の開発。

#### 4) 栽培システムと環境計測制御システム

(1) 夏期夜間冷房による収量増・品質向上への効果が大きいと言われている、トマト（大石・守谷 2011）、イチゴ、バラ（二村ら 2012, 梶原ら 2015）、トルコキキョウなどに関するより詳細な実証試験。

(2) トマト長段取りなどに適した高軒高閉鎖型温室およびイチゴ栽培用などの低軒高閉鎖型温室のそれぞれに適した環境制御法の開発。

(3) 最小限の遮光で最大収量・最高品質を得るための統合環境制御システムの開発。

(4) 室温設定値を時間帯毎に一定とせず、外気温の変化、植物成長の状況、暖冷房ディグリーアワーおよび暖冷房コストに応じて設定値を変動させるものの、有効積算温度は一定とする設定値決定方法の開発。

(5) 閉鎖型温室での利用が容易な、温湿度、日射、CO<sub>2</sub>濃度などの 3次元空間分布の計測制御システムの開発。

(6) CO<sub>2</sub> コスト、収量、品質および売り上げ額、さらには CO<sub>2</sub> 利用効率を考慮した最適化 CO<sub>2</sub> 施用法の開発。

(7) 植物群落付近に比較的低温の温度成層を形成するために、冷気の供給を低風速 (0.5 m/s 程度) かつ平均室温より 5-10°C 低い温度で行う方法。一般的

には、局所冷房と呼ばれている方法であるが、従来方法には改善の余地があると考えられる。

(8) 曇り空から急に晴天になるなどに生じる PAR 束密度の急激な増大に伴う室温の急上昇と飽差の急増に対して必要となる、細霧発生による室温低下と飽差減少の比例制御システムの開発。

#### (9) 閉鎖型温室に適した病虫害防除法の開発

パーティクルセンサーや、簡易微生物診断などの環境モニタリング技術の開発。特に出入り口の多重管理（ハードルテクノロジー）と、作業性の維持を両立させる、作業管理工程の開発。ロボット技術の導入なども視野にいたした無人化。

#### 5) 緊急時対策

(1) 停電時に備えての非常用電源とその運用法。

(2) 昼間の停電時などにおける急激な室温上昇に備えた、シャッター付き吹き込み扇、フィルム開放などによる緊急的な過高温抑制法の検討。

(3) エネルギー自律型植物工場を目指した、太陽光・風力・バイオマスなどによる発電・蓄電装置設置の検討。

(4) 停電などの緊急時に非常電源だけを稼働させて最小限の被害にとどめるには、その際でも養液栽培における養液ポンプや育苗設備は正常に稼働するような電気系統設計が必要である。

#### 5) 100 ヘクタール規模の閉鎖型温室団地に伴う問題

(1) 液化天然ガスを用いた発電、冷熱利用、CO<sub>2</sub> 利用および蓄熱システムの開発（福田 2016）。

(2) リモート植物診断技術の栽培管理への利用（高山 2016）

## 8. 研究開発の方法・ツール

閉鎖型温室を一般の温室および人工光型植物工場と技術的側面に関して比較するには、理論的考察に加えてコンピュータ・シミュレーションによる検証が必要である。

### 1) 速度変数の計測制御と見える化

閉鎖型温室においては、物質 (CO<sub>2</sub>, 水, 肥料, 種子, 生産物, 廃棄物など) の室内外間の交換速度をかなり正確に計測制御できる。一般の温室では日射エネルギーおよび熱エネルギーの室内外間の出入りの正確な制御は困難であるが、正確な計測とある程度の予測が可能である。すなわち、速度変数 (正味光合成速度, 暗呼吸速度, 給水・吸水速度, CO<sub>2</sub>

施用速度、肥料吸収速度など、時間の単位を有する変数)の測定と制御が比較的容易である(古在2009)。また、状態変数(気温、飽差、CO<sub>2</sub>濃度など、時間の単位を有しない変数)と速度変数の見える化により、環境・栽培・投入資源の管理が比較的容易になる。

## 2) 環境および制御機器のシミュレーション・ツール

閉鎖型温室における物質・エネルギーの動的収支および環境の状態変数・速度変数のシミュレーションのツールとしては TRNSYS (<http://sel.me.wisc.edu/trnsys/>) が有用であり、閉鎖型温室への応用も試みられている(Vadice and Martin 2013, Ishigami et al. 2014)。TRNSYSは、TRaNsient SYStem Simulation Toolの略称で、建物内の環境や環境制御装置の稼働状況のシミュレーションに最適なソフトウェアである。

他方、計算流体力学あるいはCFD (computational fluid dynamics) と呼ばれる、流体の運動に関する方程式をコンピュータで数値的に解くことによって、閉鎖型温室内空間の2次元または3次元の空気の流れを観察する数値解析・シミュレーション手法は、コンピュータの演算性能向上とともに飛躍的に発展しているため、今後の利用が期待される。

## 3) 植物成長シミュレーションと統合環境制御

上述の TRNSYS に、植物成長(光合成・呼吸・蒸散、葉面積拡大など)に関するシミュレーションモデルを組み入れる試みがある(Takakura and Fang 2002, Takakura and Son 2004)。開花、結実、果実の肥大成長などの数理モデルも組み込み得る。これらの動的モデルを用いたシミュレーションが実現すると閉鎖型温室の設計・制御のシミュレーションは大幅に容易化する。さらに、遮光を最小限にした統合環境制御(栽培・環境・経営・販売・発注の一元化管理)の確立および光エネルギーの利用効率を最大とする統合環境制御の実現可能性が大幅に増す。

## 4) ビッグ・データのマイニングと人工知能(AI)

閉鎖型温室では、一般の温室に比較して、換気と害虫侵入による外乱・雑音が少ない。他方、かなりの複雑系である。そこで、各種資源の投入速度・産出速度と室内環境の関係解析および室内環境と植物成長速度の関係に関して、ビッグ・データのマイニング、大規模非線形多変量解析さらには人工知能

手法の導入により、生産管理のレベルが各段に進展することになると期待される。

## 9. オランダでの経験から学ぶべきこと

De Gelder ら(2012)中の「生産者による実践での経験」に書かれている以下の事項などは、今後の日本での開発の参考になる。

1) 一般の温室と閉鎖型温室では室内環境の特徴が異なるので、作物反応がかなり異なる。したがって、一般の温室で得られた作物反応に関する知識・経験をそのまま応用してはいけない。閉鎖型温室での作物反応に関する私たちの知識はかなり不足しているという自覚が必要である。一般の温室での栽培者が閉鎖型温室の特徴を理解してそこでの栽培に慣れるには数年を必要とする。閉鎖型温室の技術普及を速やかにするには、研究者と生産者および生産者同士の密接な情報交換・意見交換が欠かせない。

2) 換気で室温制御する場合は、換気窓を徐々に開いて室温を次第に設定値に近づけている。他方、同じ気象条件下で、冷房能力が大きいヒートポンプでは室温が短時間に設定値に達しやすい。結果的に、平均室温は前者より後者の方が低くなる。すると後者では、光合成同化産物のソース(source)すなわち葉からシンク(sink)すなわち果実への配分比率が低下する。他方、前者ではCO<sub>2</sub>濃度が高いので前者の正味光合成速度(同化産物生産速度)は後者よりかなり高い。なお、閉鎖型では昼間のCO<sub>2</sub>濃度が高いので室温設定値を28~30℃まで高くすることの利点が多い。他方、夜間の室温設定値を低くして、日積算室温を一定値にする必要がある。

3) 閉鎖型では、一般に、相対湿度が高く(飽差が低く)推移する。すると、灰色かび病(Botrytis)が多発しやすく、灰色かび病による収量損失(しばしば40%)は、一般の温室におけるその2倍以上にもなることがある。つまり、飽差制御は病気抑制の点でも閉鎖型温室の重要課題である。

4) 床面積100 m<sup>2</sup>程度の閉鎖型温室では室温の水平面分布はほぼ均一であっても、大型の閉鎖型温室では場所による室温差が3℃前後にもなり、この差は室内の強制空気循環扇では改善されない。室内気温分布の改善法が必要である(玉城・関山2016)。また、冬期、温室の壁内面温度が低いと、屋根内面に沿っての室温低下が顕著で、その低温空気が作物上

に低下し、その場所の室温と飽差が減少する。このクールド・スポットの解消が必要とされる。

5) 栽培管理法や環境調節法を改善するのに、植物成長モデルの利用は有効である。

## 10. 実用化プロジェクトに向けての課題

閉鎖型温室の実用化と普及までには本稿で述べた技術的課題を含めて、多くの課題を解決する必要がある。各分野の専門家による机上の検討が一段落したら、床面積 300-1000 m<sup>2</sup> 規模での、部材・部品・装置開発、構造設計、設備設計、構造施工、設備施工、稼働試験、栽培試験などを行うことが求められる。そこでの経験を踏まえた改善を加えた後、床面積 3000 m<sup>2</sup> 規模での実用化試験が必要になる。この際、閉鎖型温室を 2 または 3 区画に分けて、区画毎の比較試験を可能にすると実用化に向けた有用なデータが得られる。

このプロジェクトは、3-5 年間にわたることになるので、たとえば、関係省庁の支援の下、複数の企業と学識経験者が協働して実行するに値する。その実行には、実施計画、組織および予算が必要となる。閉鎖型温室が実用化されれば、日本だけでなく世界中で普及することになる。本稿では述べなかったが、閉鎖型温室で商業的に植物生産するには、完成度の高い統合環境制御システムが必須である。また、閉鎖型温室を大規模に展開するには、育苗・栽培・収穫・運搬などの自動化が必須である。ただし、両システムは一般の温室のそれとの共通部分が多い。

## 11. おわりに

閉鎖型温室は、上述したように、一般の温室と比較して、環境制御の質が格段に高くなる。他方、実現には比較的大規模な研究開発が必要とされる。しかし、その成果は、省資源・環境保全と高品質・高収量食料生産の実現に直結するので、わが国だけでなく、世界に広く普及するに値するものになる。

## 謝辞

本原稿は、第 1 著者が作成した原稿に第 2-第 6 著者が加筆修正を加え、さらに以下の閉鎖型太陽工場調査検討委員会委員の方々のコメントを考慮して最終稿としたものである。関係者に深甚の謝意を表

する。須藤晴彦（富士電機（株）丸山真一（株）朝日工業社）、八塩 彰（清水建設（株））、奥村久雄（帝人（株））、藤原誠二（パナソニック（株））、林 絵里（植物工場研究会（NPO））。須藤晴彦（富士電機（株））。図 2 は、坂口俊輔（プランテックス社）が作成した Excel 関数により作図した。謝意を表する。

## 引用文献

- Biernatzki, R. and R. Meinnecke 2014. Closed greenhouse concept: Integrating thermal energy storage (TES) applied to aquaponics systems. 978-1-4-799-6557-1/14/, IEEE.
- De Gelder, A., J.A. Dieleman, G.P.A. Bot and L.F.M. Marcelis 2012. An overview of climate and crop yield in closed greenhouses. J. of Horticultural Science and Biotechnology 87(3): 193-202.
- Ishigami, Y., E. Goto, M. Watanabe, T. Takahashi and L. Okushima 2014. Development of a simulation model to evaluate environmental controls in a tomato greenhouse. Acta Hortic. 1037: 93-98.
- Iwasaki Y, 2008, Root Zone aeration improve growth and yields of coir-cultured strawberry (*Fragaria ananassa* Duch) during summer. Acta Hort. 779: 251-254.
- Takakura, T. and W. Fang 2002. Climate under cover. Kluwer Academic Publishers. pp.190.
- Takakura, T. and J. E. Son 2004. Simulation of biological and environmental processes. Kyusyu University Press. pp.139.
- Vadiei, A. and V. Marting 2013. Energy analysis and thermoeconomic assessment of the closed greenhouse - The largest commercial solar building. Applied Energy 102: 1256-1266.
- 壇 和弘・菅野 亘・中原俊二・後藤直子・岩崎泰永・高野岩雄・沖村 誠・日高功太・高山智光・今村 仁 2015. 宮城県での促成栽培イチゴにおけるクラウン温度制御技術の現地実証, 九州沖縄農業研究センター報告 64 : 1-11.
- 福田晴久 2016. メガスケール植物工場の具体化に向けた論点. スマート・メガスケール植物工場ネットワークによる国際競争力のある農作物生産(日本学会会議公開シンポジウム) 講演要旨集.
- 岩崎泰永 2007. イチゴ夏秋どり栽培における環境調節(第 1 報) 遮光および培地冷却が四季成り性品種および一季成り性品種の花芽分化と果実収量に及ぼす影響. 宮城県農業・園芸総合研究所研究報告 (77) : 10-15.
- 岩崎泰永・吉田千恵・漆山喜信・吉田啓孝・斉藤貞文・山本聡史・林 茂彦・池田英男・池田 敬 2012. 移動栽培装置を利用したイチゴの高密植栽培に適した栽培ベッドの間隔と養水分供給方法の検討. 園芸学研究 11 (1) : 49-57.
- 梶原真二・石倉 聡・福島啓吾・道園美弦 2015. 高温期における夜間の短時間冷房がバラの切り花収量および形質に及ぼす影響. 園芸学研究 14 (4) : 365-369.
- 河崎 靖・安 東赫 2015. 夏季高温期の夜間における開花房付近の局所的な冷却がトマトの果実収量に及ぼす影響. 植物環境工学 27 (3) : 137-143.

- 古在豊樹・権 在永・林真紀夫・渡部一郎 1985. 温室の冷房負荷に関する研究 (1) 夏期夜間の負荷特性. 農業気象 41 (2) : 121-130.
- 古在豊樹・権 在永・林真紀夫・渡部一郎・新古忠之・樋口春三 1986. 温室の冷房負荷に関する研究 (2) 夜間の冷房負荷軽減について. 農業気象 41 (4) : 351-357.
- 古在豊樹 2009. 太陽光型植物工場. オーム社. pp.186.
- 古在豊樹・糠谷綱希・渋谷俊彦・丸尾 達 2014a. 施設園芸におけるゼロ濃度差 CO<sub>2</sub> 施用 (1) その原理と実際. 農業および園芸 89 (6) : 643-652.
- 古在豊樹・糠谷綱希・渋谷俊彦・丸尾 達 2014b. 施設園芸におけるゼロ濃度差 CO<sub>2</sub> 施用 (2) その原理と実際. 農業および園芸 89 (7) : 749-758.
- 古在豊樹・関山哲男 2016. 園芸施設内上部空間の昼間気温が下部空間の気温より高い原因について. 農業電化. 二村幹雄・山口徳之・池内 都・和田朋幸 2012. 夏期高温時の超微粒ミスト噴霧と夜間冷房がバラ切り花の収量・品質に及ぼす影響. 愛知農総試研報 44 : 53-59.
- 大石直記・守谷栄樹 2011. ヒートポンプによる盛夏期夜間の環境制御がトマトの生育および果実肥大に及ぼす影響. 園芸学研究 10 (別1) : 108.
- 関山哲雄・古在豊樹 2015. 園芸施設の空調にヒートポンプを使用する場合のコスト削減に係わる課題 (中間報告). 農業電化 68 (2) : 12-16.
- 関山哲雄・玉城 鉄 2015. 園芸施設における地表伝熱の特性と床面被覆資材の評価法. 農業電化 68 (7) : 6-10.
- 関山哲雄・古在豊樹 2016. 園芸施設の空調にヒートポンプを使用する場合のコスト削減に係わる課題 (第2報). 農業電化 69 (3) : 6-10.
- 玉城 鉄・関山哲雄 2016. ハウス植被域における気温むらとトマト生育のばらつき状況について. 農業電化 69 (2) : 4-9.
- 高倉 直 2003. 植物の生長と環境調節—新しい視点と環境調節の課題. 農文協 pp.194.
- 高山弘太郎 2016. ロボット化された植物診断技術が可能にする大規模生産管理. スマート・メガスケール植物工場ネットワークによる国際競争力のある農作物生産 (日本学術会議公開シンポジウム) 講演要旨集.