

太陽光併用型植物工場における光の効率的な利用システムの検討

誌名	植物環境工学
ISSN	18802028
著者名	芦田,恵樹 清水,智美 建山,和由
発行元	日本植物工場学会
巻/号	19巻2号
掲載ページ	p. 59-65
発行年月	2007年6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



太陽光併用型植物工場における光の効率的な利用システムの検討

芦田恵樹¹・清水智美²・建山和由²

¹立命館大学大学院理工学研究科

²立命館大学工学部 建築都市デザイン学科 525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1

Study of Efficient Lighting Systems for Conditioned Greenhouses

Shigeki ASHIDA¹, Tomomi SHIMIZU² and Kazuyoshi TATEYAMA²

¹Graduated School of Ritsumeikan University

²College of Science and Engineering, Ritsumeikan University Noji-higashi 1-1-1, Kusatsu, Shiga 525-8577, Japan

Abstract

Highly conditioned greenhouses, including plant factories, are expected to provide greater product availability for increasing food requirements, especially here in Japan. There are generally two types of lighting systems employed at plant factories. One is a sunlight system and the other is an artificial light system. The sunlight system requires that a massive amount of expensive glasses be installed all around the sides of a greenhouse, which causes the structure to be relatively weak. This problem raises the costs of construction. To counteract the situation, we have conducted a study on how to efficiently use sunlight with reflective materials on the internal side walls of a greenhouse. Firstly we verified the effect of the reflection through a numerical simulation and some basic experiments, in which the illumination of a rectangular space on the floor was measured. The illumination on the floor and the growth of the test plants were seen to greatly improve through the use of the reflecting walls. The results of this experimental study are helping us to realize the potential of employing less glass in greenhouses and the possibility of applying freer designs to their structures. We also investigated a lighting system for thermal control, whereby sunlight is converted into thermal energy. In this system, the energy is stored in thermal-preserving materials during the daytime and then used for heating during the nighttime in winter. We confirmed the applicability of this system through an experimental study. Finally, we proposed a new system for conditioned greenhouses which uses natural energy more efficiently and offers more flexibility in the structural and the architectural designs.

Keywords: conditioned greenhouse, experimental study, lighting efficiency, plant factory, reflecting wall, sunlight

緒言

目まぐるしく変動する国際情勢, 予測困難な異常気象とそ

の進行が懸念される地球温暖化, 増え続ける世界人口. これら世界の動きと地球環境に影響され, 食料問題は人類が緊急に取り組みなければならない最重要課題のひとつとなっている. 世界的規模で進展する食料危機や, 極端に低下してしまった日本の食料自給率, 将来にわたる食料の確保など, 我々は今後起こり得る食料問題を認識し, それに対応することのできる食料自給体制を早急に構築していかなければならない.

2006年6月20日受付

2006年12月1日受理

Corresponding author: Shigeki Ashida

(s-ashida@se.ritsumeik.ac.jp)

このような背景の下、近年では植物工場のように、光や空気、水などの環境を高度に制御した生産効率の高い施設栽培が注目され、徐々にその数を増やしている。さらに農業の使用が少なく細菌の発生も抑制できるという食の安全や安心の観点、また農業雇用問題への対応や企業の参入契機としても注目されている。

植物工場には、主に自然光を利用する太陽光併用型と、完全に閉鎖された環境内で人工光を用いて植物を育てる完全制御型がある。このうち完全制御型は、植物の生育環境を制御するにあたり多くのエネルギーを要している。一般的には、生産コストの約3割を照明や空調に必要な電気代が占めている。一方太陽光併用型では、ガラスとその強固な保持構造が工場の建設コストを増大させるとともに、建築物としての自由度を著しく制限している。また太陽光が直接入射することによる夏季の過度な温度上昇への対策も大きな課題である。これらの問題は、植物工場の普及に対して大きな障壁となっている^{1)~3)}。

本研究では、太陽光併用型植物工場に着目し、太陽光を始めとする自然エネルギーを最大限有効利用することのできるシステムの構築とともに、建築物として自由度の大きな構造の提案を目指し、屋内外における実験と簡単な数値計算を行った。この研究の特徴は、

- 1) 既往の植物工場で用いられているガラス壁面に換えて内壁面に反射板を用いることにより、太陽光の有効利用を図る。
 - 2) 蓄熱材を用いて自然エネルギーの時間差利用を図る。
 - 3) 壁面を従来のようにガラス材に特定しないことにより、建築構造物として新しい植物工場を提案する。
- である。以下にその概要を紹介する。

反射板を利用した照度の改善に関する基礎実験^{4,5)}

本研究では最初に、反射板による照度の改善効果を調べるために基礎実験を行った。ここでは、植物工場のミニチュアモデルを想定したコンテナの天井や内壁面に反射板を配置し、天井に取り付けた照明による床面の照度の計測値について反射板を配置していない場合と比較した。この効果については単に照度の値としてのみならず、植物の実際の生育状況についても比較を行った。続いて太陽光の利用を考慮し、植物工場モデルを屋外に設置して、太陽光を対象とした反射板の利用効果についての検証を行った。ここでは採光面の配置と非採光面への反射板設置による影響を考察した。

なお従来から反射板や反射型ブラインド、プリズムなどを用いた光の効率的な利用方法は提案されており、内壁面に鏡を配した実験的植物工場や人為的に表面を粗くした反射板

などが既に存在している³⁾。本基礎実験はその効果を実証したものである。

以下、これらの実験について説明する。

1. 室内灯での照度向上に関する検証

材料および方法

植物工場の栽培空間は間口10 m、奥行き3.6 m、高さ5 mを想定する。実験に先立ち、反射板の利用による照度の改善効果について数値計算により検討を行った。計算では、上記の栽培空間の天井中央部に照明用の電球を配し、床面での照度を(1)式⁶⁾を用いて計算したが、このとき壁面および天井面の反射率を変化させて床面照度の違いを調べた。計算結果は、各面反射率50%の場合を基準とし、その倍率をとって照度の相違として表した。Fig. 1はその計算結果を示したものである。

$$E = NFMU/A \quad (1)$$

ここで、E:平均照度、

N:ランプ数(今回N=1)、

F:ランプの光束(同F=8000 lm)、

M:保守率(同M=0.7)、

U:各面の反射率と室指数R(同R=0.53)により得られる照明率、

A:床面積(同A=35m²)

この図より、天井、壁面とも反射率が大きくなると床面の照度が増加し、反射率が90%の場合、10%の場合に比べて約2倍の照度が得られることがわかる。

この結果を受けて、実際に反射板による照度の改善効果の計測を行った。実験では、先に設定した栽培空間のモデルとして、長さの縮尺で1/10サイズの実験施設を設定した。ただし間口方向は非反射面を設けて対称形としたため、モデルの間口長さは500 mmである(実際は電灯を設置するため

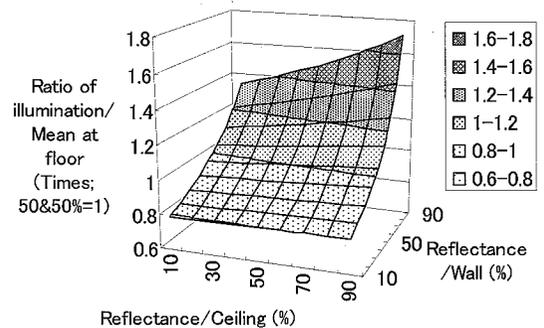


Fig. 1 Calculated illumination, as a ratio, of the floor with reflectance from the walls and the ceiling, according to the Experiment No.1 (50% reflectance each; ratio = 1).

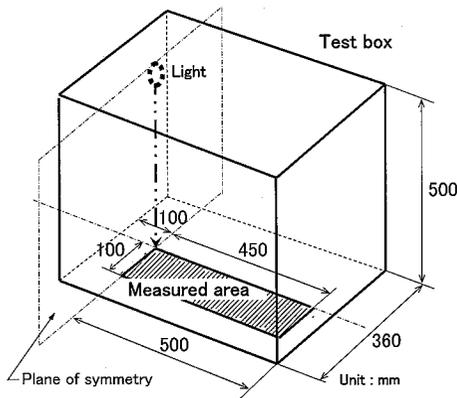


Fig. 2 Model used in Experiment No.1 with artificial light.

Table 1 Measured reflectance of each reflective material used in the experiment

Material	Reflectance (%)
Aluminum foil (Smooth surface)	82.1
Aluminum foil (Rough surface)	57.5
White paper (for Drawing)	43.2
Light colored paper (Cardboard)	16.9 (Reference)

にさらに 100 mm をとった)。実験モデル施設には、内壁面に淡色であるダンボール紙を貼った直方体のコンテナを用い、この内壁面を標準とした。このコンテナ内に電球を配し、先の計算と同様に天井と内壁の反射率による床面照度の相違を計測した。電球は 60 W 型、直径 30 mm の白熱灯を使用し、天井と同じ高さで設置している。モデルの概要および計測範囲を Fig. 2 に示す。照度は、計測範囲の周囲 8 点に照度計を上向きに設置して計測した。反射板は天井面および全側壁面（対称線面を除く）に設置した。反射材料として、滑面アルミ箔、粗面アルミ箔および白紙を用い、淡色内壁（標準）として想定したダンボール紙での計測結果と比較した。なお各材料の反射率については、暗室において単一指向性白色 LED 光を 45° の角度で入射し、反射光と直接光の照度を計測してその比率から算出した。その結果 Table 1 に示す値が得られた。

結果と考察

計測結果として、各条件での測定面の照度分布を Fig. 3 に、床面照度の比較を Table 2 に示す。同表には、前述の計算を用いて実験条件のパラメータに対応する照度を計算した結果も併せて示している。反射板の設置によって床面の平均照度が上がり、その効果は淡色内壁（標準）の 1.4 ~ 1.7 倍が得られていること、ならびに反射板の材料としては、滑面アルミ箔が最も大きな改善効果が得られることが分った。また

この表における照度改善比率の計測値と計算値を見ると、照度改善の小さい白紙や粗面アルミ箔において若干計算値が小さく見積もられるものの、その増加傾向や滑面アルミ箔での値では前述の計算方法で求めた照度と実験値はよく一致しており、前述の理論式による評価の妥当性が示される。

次に反射光によって照度を向上した場合での実際の生育効果を確認するため、内壁を黒色および銀色としたコンテナ内において、チマサンチュ（青葉種）の約 10 日間の発芽状況を比較した⁷⁻⁹⁾。栽培はプランターを用い、人工培地（パールライト）において室温（16 ~ 18℃）、24 時間照明にて生育した。その間施肥は行わず、培地が乾燥しないように適宜加水をした。なお使用したコンテナは Table 1 に示した材料と異なる内壁であったため、同様の方法でその反射率を計測した。その結果、黒色壁は実測反射率 9.8%、銀色壁は 64.1% であった。その 10 日後の生育状況を Fig. 4 に示す。この図では画像処理を行い、生育して葉となった緑色部を黒色で強調して示している。銀色内壁を配した A に示すコンテナのほうが、明らかに葉が多く育っていることがわかる。個体長では黒色内壁コンテナに比べて約 2 倍の生育長が得られた。なお発芽期は一般に必要なとる照度が少なく³⁾、光環境の影響が小さい可能性が考えられるため、効果をより明確にするためにはさらに栽培期間を延長した生育比較が必要である。しかし発芽 10 日後の比較においても、すでに反射光による照度の改善が植物の生育にも効果的であることが確認できた。

2. 太陽からの採光に関する検討

材料および方法

太陽光を採りこむ栽培施設においても、内壁に反射板を配することによって照度の改善効果が得られることを検証するために実験を行った。実験では施設モデルとして、全面がガラスで構成されたデシケータを用いた。計測にあてた空間は、間口 500 mm、奥行き 500 mm、高さ 400 mm の直方体形状

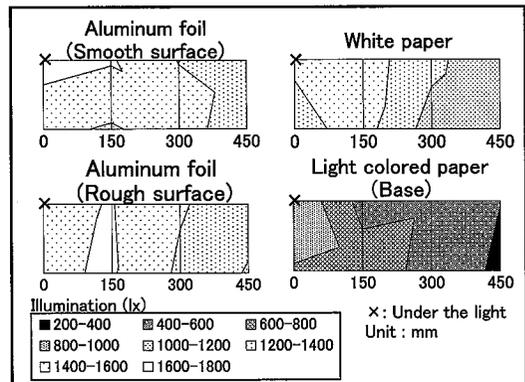


Fig. 3 Measured illumination in Experiment No.1 with artificial light.

Table 2 Comparison of the measured illumination at each reflective condition in Experiment No.1 with artificial light, including the calculated results

Reflecting material	Illumination (lx)	Ratio (Measured)	Ratio (Calculated)
Aluminum foil (Smooth surface)	1684	1.71	1.70
Aluminum foil (Rough surface)	1555	1.58	1.28
White paper (for Drawing)	1427	1.45	1.15
Light colored paper (Cardboard)	985	1	1

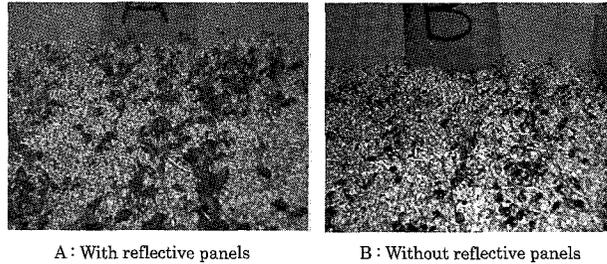


Fig. 4 Comparison in growth of the test plants after 10 days.

である。計測は北緯 35°地点 (滋賀県草津市) にて、1月28日正午に行った。このため太陽高度は仰角でおよそ 40°である。計測は床面で、照度計を鉛直上向きに設置して行った。実験は以下の 3 ケースに対して行い、結果の比較を行った。

- 全面ガラスとした従来の採光方式 (標準)³⁾
- 天井面からのみ採光した方式
- 天井面に加え南面からも採光する方式

非採光面の内側には、前出の実験で最も効果の大きかった滑面アルミ箔を反射材とし、これを設置した。

結果と考察

計測した照度分布を Fig. 5 に、各条件での照度の比較を Table 3 に示す。なおこの表には、後述する計算結果での比較も併せて示している。計測結果では、全面をガラスとして採光した場合と比較し、天井からのみの採光では平均照度が 0.66 倍に減少したが、南側からの採光を追加することにより 1.4 倍となった。

これらの計測値から反射面の配置と照度の関係を分析し、他の採光条件での照度が推定できるような一般化を図るため、モデル底面 (計測面) に到達する光の量に着目して理論的考察を行った^{10, 11)}。この考察では、Fig. 6 に示すように太陽光の入射とその反射による床面の照度を南北方向の鉛直平面内 (2次元) で計算した。ここでは実験条件とあわせて、太陽光の入射を仰角 40°、ガラスの反射率を 10% (既往の資料⁶⁾ より想定)、反射材は 82% (前出の実測値) とした。Table 3 の計算結果はここで得られた値を示している。この結果によると、各実験条件での床面の照度は、全面をガラスとした標準の場合のそれぞれ 0.77 倍、1.6 倍となり、実験結果よりも 13~14% 程度大きな値となっている。これは、計算では

平面内 (2次元) の光の入射しか考えていないため、全面ガラス (すなわち東西面もガラス) の標準ケースのみで生じる東西側面からの光の入射が考慮されず、このケースの照度のみが小さく見積もられてしまったためと考えられる。

この計算方法が適用できるとすると、植物工場の構造として天井をガラス張りとしなくても、南面のみにガラス壁を設置し他の内壁面に反射板を配することにより、全面採光に対し約 73% の照度が得られるという結果が得られた。さらに本計算方法では内壁面での反射を 1 回のみとして 2 回目以降は無視しているが、実際には光は繰り返し反射するため、計算値より照度が増加することも考えられる。このことは、反射板を内

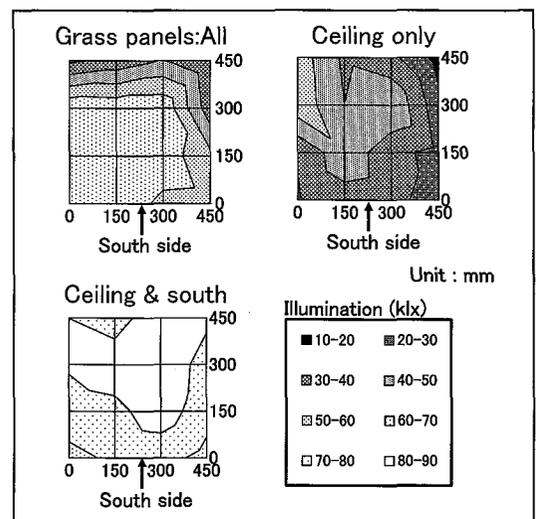


Fig. 5 Measured illumination in Experiment No. 1 with sunlight.

Table 3 Measured illumination in Experiment No. 1 with sunlight, including the calculated results

Glass panels	Illumination (lx)	Ratio (Measured)	Ratio (Calculated*)
All directions	57303	1	1
Ceiling only	37772	0.66	0.77
Ceiling and south	80181	1.4	1.6

Calculated; Without the effects of east-west sides.

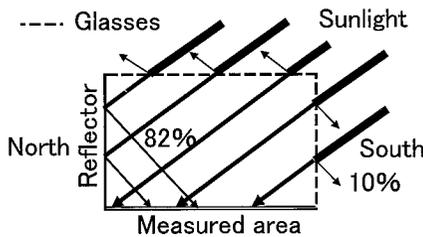


Fig. 6 Image of the lighting conditions for the calculation of the illumination in Experiment No.1 with sunlight.

壁として利用することによって南面からの採光のみを考慮した植物工場の建築設計が可能となり、建築構造としての自由度を大幅に広げ得ることを意味している¹¹⁾。

今回は単に採光面はガラス、非採光面は反射板として計測したが、採光面や反射面にブラインドやプリズムを用いた機構を適用して反射光の制御を行うことにより、採光効率を向上させることで、さらに十分な採光を見込むことができる。このような採光面での効率の向上による効果は、今後確認していく予定である。

温度制御における床下空間の効果に関する実験¹²⁻¹⁴⁾

本研究では、反射板を用いると特定面から十分な採光が得られるなど基礎実験での知見を考慮して、南面のみから採光する植物工場を想定し、その栽培空間の床下に温度環境制御用の空間を設置することを考案した。これは栽培空間の床下に、反射板を用いた集光により得られた自然エネルギーを熱として蓄積し、その時間差利用を図るシステムの構築を考えたものである。ここでは栽培空間の床下に別の空間を設置し、冬季には太陽光から変換してこの空間に熱エネルギーを蓄え、これを利用して施設内の温度制御を行うこと、また夏季は遮光によりここを冷空間として、栽培空間の温度差換気の促進に利用することを想定している^{3, 10, 11)}。この考案につい

て、床下空間による栽培空間の温度制御への効果を、モデルを用いた実験によって検討した。

材料および方法

本実験では、栽培空間の全面がガラスで構成される従来型植物工場のモデルと、南面のみをガラスとした今回考案の工場のモデルについて、照射時(日中)と消灯時(夜間)の床面の温度変化を比較した。

実験では、間口および奥行きが共に 500 mm のデシケータを植物工場のモデルとし、高さ 400 mm の直方体形状の栽培空間を設定した。考案した工場のモデルには、栽培空間の下に床面と同面積で高さ 300 mm の床下空間(直方体形状)を設け、床下空間底面の直射部分、東西方向中央に蓄熱材として高分子材とコンクリート板を設置した。高分子材はゲル状で長さ 200 mm、幅 100 mm の袋詰めとなっており、袋状での厚さは 15 mm である。これを 250 mm 角で厚さが 25 mm の乾燥したコンクリート板上に長さ方向を東西にして重ねることにより、主に高分子材が直射を受けて熱を蓄え、コンクリート板がこれを補う配置とした。採光は南面からとし、非採光面の内壁面には反射板(実測反射率 64.1%)を配した。床下空間は、南面に遮光パネルを着脱し、夏季には完全遮光、冬季には南面から採光するよう設定した。また床下空間への冬季の採光では、直射に加えて東西および北側内壁に設置した反射板でも集光、蓄熱できるようにした。実験の概要を Fig. 7 に、実験条件を Table 4 に示す。実験条件は夏季と冬季を想定し、夏季を s、冬季を w として表している。

実際の実験は、Table 4 に示す実験条件を得るために、照明、温度、湿度などの環境を制御することのできる設備内で行った。夏季と冬季の条件は、それぞれ照射の仰角を夏至および冬至における太陽の南中高度と合わせて 79°、31°とし、外気温を 30℃と 5℃に設定した。また夏季は北面上端に換気部(デシケータの北側上端一辺 500 mm に 5 mm の隙間)を設け、冬季はこれを閉じた。照明は、250 W の水銀灯 1 基を用い、床面南端中央を照射中心として 600 mm の距離

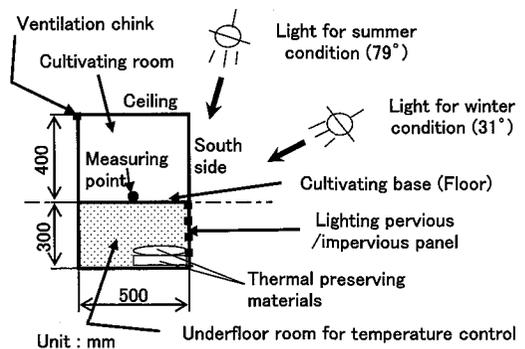


Fig. 7 Outline of the model used in Experiment No. 2.

Table 4 Conditions for Experiment No. 2

Conditions	Underfloor room	Glass	Season	Sunlight	Temperature outside	Ventilation
s-Standard	No	All	Summer	79°	30°C	Yes
s-Proposed	Yes	South				
w-Standard	No	All	Winter	31°	5°C	No
w-Proposed	Yes	South				

をおいて設置した。

結果と考察

実験によって得られた栽培空間床面の温度変化を Fig. 8 に示す。夏季および冬季を同一の図面で示している。破線が従来型（記号は Standard）、実線が今回考案した工場モデル（同 Proposed）での計測結果である。照射および消灯による温度変化は、変化がほぼ一定となった3時間後までの経過について示した。

この図より、冬季日中は反射板による集光効果による温度の上昇が見られ、また夜間は蓄熱による保温効果が確認できる。太陽からの採光を温度制御に積極的に利用できる冬季においては、今回提案した床下蓄熱空間の効果が大きく発揮されている。一方夏季は、提案した工場モデルにおいて、天井を遮光したことによって採光量自体が少なくなり、日中の温度上昇の抑制効果が見られるものの、夜間の温度低下は予想していた温度差換気の効果が見られず、むしろ床下空間を設けた提案モデルのほうが遅い結果となった。またこれらの差は冬季ほど顕著ではない。夏季の温度差換気の効果をも十分に発揮させるためには、地下恒温水による細霧冷却を併用する³⁾など、床下空間の温度をさらに低下させるに工夫が必要であることがわかった。

自然エネルギーを有効利用した植物工場の提案^{11, 15)}

両実験の結果を踏まえ、効率的に太陽光を利用する植物工場について、以下のとおり提案する。

1) 工場を東西方向に長く配し、採光面を南面とする。天井は必ずしも全面をガラスとする必要はなく、天井からの採光面を少なくするか、あるいはブラインド等を利用して採光量を制御できるようにする。これにより夏季には高い位置（入射仰角78°；東京、夏至）からの日射を調整することにより、室内の過度の温度上昇を抑えることができる。一方、冬季には横向き（入射仰角31°；同、冬至）の日射を有効に採り入れ、さらに採光を行わない面の内壁に反射板を用いることにより、照明効果を向上させることができる。採光面や反射面については、反射型プリズムやブラインドなどを用いて反射効率をさらに向上させてもよい。これによって十分な栽培照度を確保していく。

2) 工場の床下（地下または半地下）に空間を設置し、冬

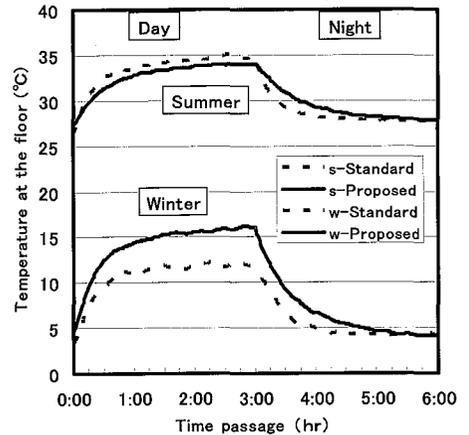


Fig. 8 Changes in temperature on the floor of the cultivating area in the model used in Experiment No.2.

季は入射仰角の低さを利用して積極的に南面から太陽光を採りこむ。この内側壁は反射板として光を底面に集中させ、ここに蓄熱材を配して太陽熱を保持する。これにより冬季夜間に床上の栽培空間における温度を高く保つことができ、効率的な温度制御が可能となる。一方夏季は太陽光の入射を妨げ冷暗室とし、北側上面に排気窓を設置することで、栽培空間内の暖気と床下空間からの冷気による温度差換気を促進させる。ただし十分な換気効果の発揮には、遮光による冷暗状態に加えさらに地下恒温水による細霧冷却を併用するなど、積極的に温度を下げる機構を考慮する必要がある。

3) 今回の研究結果を利用すると、太陽光併用型植物工場においても反射内壁面を利用した適切な採光設計を行えば、従来のように全面ガラス張りの建築構造に限定することなく、屋上面、壁面を自由な構造、材料とすることができる。このことは、植物工場においても、強度面からの安定性を画期的に向上させることができるのみならず、建物のデザインでも自由な設計が行えることを意味している。また、非採光面の新たな有効利用を検討することもできる。たとえば太陽光発電や太陽熱利用温水などの設備を屋上面に設置することにより、自然エネルギーの利用促進を図ることもできる。このことは、これからの植物工場のイメージを大きく変えることができる結果であると考えている。

摘 要

今回の実験検討により、特定面からの部分採光によって工場内に光を十分に行き渡らせることができることを検証し、太陽光を考慮した植物工場に関する知見を得ることができた。さらに床下に配置した温度環境制御用空間の効果について確認し、Fig. 9 (a), (b) にそのイメージの一例を示すような、効率的な植物工場に関する提案に結びつけることができた。本提案によって期待される効果は以下のとおりである。

- 1) 補光用の照明や空調にかかるエネルギーの消費を抑えることができる。
- 2) 非採光面の有効利用を検討できる。たとえば太陽光発電や太陽熱利用温水設備など屋上を利用した工夫も取り込むことができる。
- 3) 採光面（ガラス面）の縮小によって、植物工場の建築形状の自由度が増大する。これによって周辺景観との調和に配慮する設計が可能となり、都市部の再開発地や工場、学校跡地を利用した植物工場の新設が検討できるようになる。都市住民が憩いの場としても利用できる親和形状の設定も可能である。
- 4) 全面ガラス張りの従来型工場に比べ、適切な壁材の材質

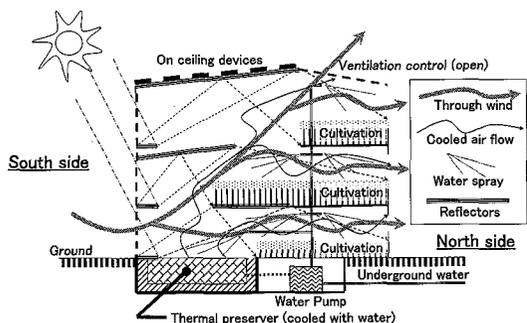


Fig. 9 (a) Sample image of a greenhouse based on the proposed concept (in summer).

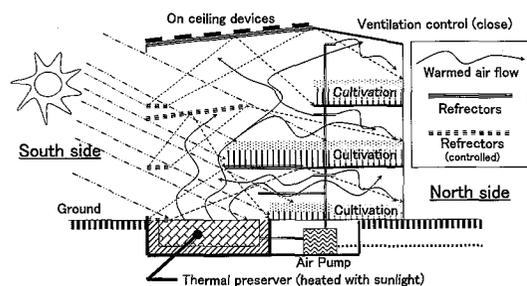


Fig. 9 (b) Sample image of a greenhouse based on the proposed concept (in winter).

を選択すると構造を軽量化することができるため、既存建物の屋上への植物工場の新設が検討できる。

- 5) 特定面からの採光を効率的に利用する技術は、通常側面だけに採光面を有する既存建物を利用した植物工場への用途変更、改築にも適用が可能であり、植物工場の新設による初期投資の負担が軽減され、普及が促進される。

これら効率的にエネルギーを利用した植物工場については、今後さらに実規模での検証を始め、工場の全体制御システム、局所での照明や温度の制御など、さらなる効率化の検討を行うとともに、建築構造物としての植物工場のあり方についても研究を行っていく予定である。

引用文献

- 1) Takatsuji M. The basic and practices of plant factories (in Japanese). Shokabo, Tokyo. 1-164. 1996.
- 2) Takatsuji M. System of plant factory (in Japanese). CMC, Tokyo. 1-56, 253-281. 2001.
- 3) 社団法人日本施設園芸協会 (Japan Greenhouse Horticulture Association). 五訂 施設園芸ハンドブック. 園芸情報センター, 東京. 6-60, 102-216. 2003.
- 4) The Illuminating Engineering Institute of Japan. Lighting Handbook 2nd Edition (in Japanese). Ohmsha, Tokyo. 53-197, 69-371. 2003.
- 5) 大山松次郎, 小原清成, 池田絃一, 野口 透, 高橋貞雄, 伊吹 順. 新しい照明ノート. オーム社, 東京. 100-125. 1996.
- 6) Matsushita electric works. Manuals for lighting design (in Japanese). 2005. (<http://biz.national.jp/Ebox/sekkei/index.html>, 2006年1月17日参照)
- 7) 森田茂紀, 大門弘幸, 阿部 淳. 栽培学. 朝倉書店, 東京. 56-96. 2006.
- 8) 西尾道德, 古在豊樹, 奥 八郎, 中筋房夫, 沖 陽子. 作物の生育と環境. 農山漁村文化協会, 東京. 1-18, 39-138, 211-230. 2000.
- 9) 池田英男, 川城英夫. 野菜栽培の基礎. 農山漁村文化協会, 東京. 15-92. 2005.
- 10) 相原良安. 新農業施設学. 朝倉書店, 東京. 26-60. 1994.
- 11) 環境工学教科書研究会. 環境工学教科書第二版. 彰国社, 東京. 100-168. 2005.
- 12) 宿谷昌則. 光と熱の建築環境学. 丸善, 東京. 1-302. 1993.
- 13) 図解住宅学編集委員会. 住まいの環境. 彰国社, 東京. 112-115. 1998.
- 14) 岡村明彦. わかりやすい蓄熱の技術. オーム社, 東京. 17-33. 2002.
- 15) 中島康孝, 傘木和俊. 環境建築のための太陽エネルギー利用. オーム社, 東京. 1-172. 1998.