

## 〈論文〉

## 乾燥地における省エネルギー型節水植物工場空調システムのシミュレーションによる最適設計

松尾 誠治<sup>1)</sup>, 平子 陽太郎<sup>1)</sup>, 王 立 邦<sup>1)</sup>  
 藤田 豊久<sup>1)</sup>, 岩崎 泰永<sup>2)</sup>, 梅田 大樹<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> 東京大学 大学院工学系研究科 システム創成学専攻  
 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1 E-mail: matsuo@geosys.t.u-tokyo.ac.jp)

<sup>2)</sup> 農研機構 野菜茶業研究所 施設野菜生産技術研究グループ  
 (〒470-2351 愛知県知多郡武豊町字南中根40-1 E-mail: iwasakiy@affrc.go.jp)

<sup>3)</sup> ㈱サイエンス・クリエイト 研究開発事業部  
 (〒441-8113 豊橋市西幸町字浜池333-9 E-mail: umeda@tsc.co.jp)

## 概 要

今後水不足が懸念される半乾燥地域における省エネルギー型の節水植物工場を実現する空調設備のシミュレーションを用いた最適設計を実施した。設計では節水ハウス内の熱量収支・水分量収支のモデルを制約条件とし、作物の生育環境の維持に最適となる環境要素の組み合わせを求めた。その際、水分ロスと使用電力の両者を電力で一元化する目的関数を提案した。その結果、環境調節要素として新たに導入した潜熱蓄熱材、塩分除去による水冷熱、太陽熱利用吸収冷凍機型除湿機の有効性が確認できた。また、提案した目的関数により節水かつ大幅な省エネルギー化が見込まれる最適な環境調節要素の組み合わせが達成でき、今後の実装への有効性が窺えた。

キーワード：植物工場，省エネルギー，節水，空調システム，最適設計

原稿受付 2013. 6. 22 原稿受理 2013. 8. 28

EICA: 18(4) 52-59

## 1. はじめに

近年、地球温暖化の進行や急速な人口増加が指摘され、その影響はエネルギー・環境分野のみならず水を取り巻く環境にも及んでいくと考えられている<sup>1)</sup>。この水問題、特に農業用水問題は海外依存率の高い我が国の食料問題に今後大きな不安を与えることが危惧される<sup>2)</sup>。例えば、2005年日本に輸入された農作物や食料品の生産に必要な水の量（バーチャルウォーター・仮想水）の推定値はおおよそ800億 $m^3$ と国内年間水使用量に相当し<sup>3)</sup>、我が国が水資源を通じ世界と密接に繋がっていることを示している。この気候変動にともない農業用水不足の影響を最も受けると考えられるのが世界の約3分の1の人々が住む乾燥地域であり、中東、東アジア等の乾燥地化や中国、米国など都市部の渇水化など既にその問題が懸念され始めている<sup>2)</sup>。このような状況を鑑み、著者らの研究グループは今後水不足の影響が懸念される半乾燥地域でかつ乾燥地農業を想定しなければならぬ地域において、水利用効率を最大化させる超節水農業の実現を目指した節水型植物工場システムの構築を提案している（Fig. 1）。ここでいう半乾燥地とは、乾燥指数（P/PET）、すなわち、降水量（P）と蒸発散位（PET：地表や植物表面が湿

潤な場合における最大の蒸発散量）の比が0.20から0.50、年間降水量が冬雨季で500mm未満、夏雨季で800mm未満の地域で、安定した放牧や天水農業は可能だが降水量が少ないときは被害を受ける地帯を示す。日中の温度は40℃前後で日較差が大きく夜間は10℃前後となる。また、乾燥地農業とは、灌漑（農作物の生育に必要な水を水路などで供給し耕作地を潤す）による水供給が困難で、降雨を利用して作物に必要な水を供給し栽培を行う農法を示す。Fig. 1に示す提案システムは、乾燥地のわずかな水の取り込みを考慮し、水の再生・循環利用システム、蒸散水回収システム、

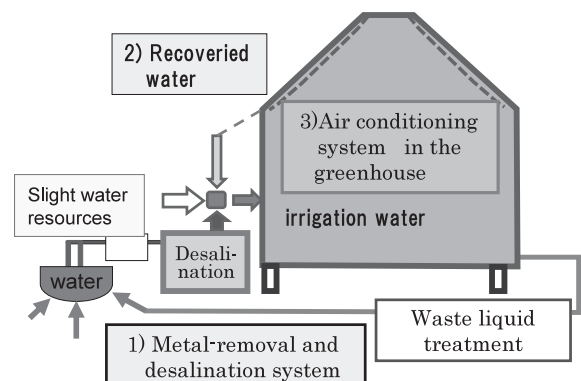
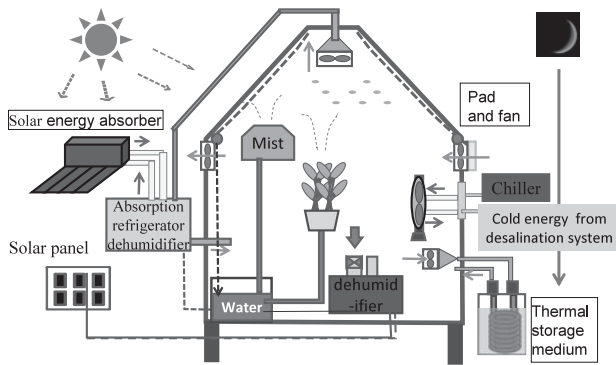


Fig. 1 A plant factory with a high-efficient water use in arid area

省エネルギー型節水植物工場から構成される。水再生システムでは塩分除去に対し後述する冷凍法による分離手法を用いることで、再生水供給と同時に分離に用いた水冷熱をハウスに供給し省エネルギー化を図っている<sup>7)</sup>。

本報では、このうち **Fig. 2** に示す省エネルギー型節水植物工場（以下、節水ハウス）の空調システムの最適設計について検討を行った。研究では、まず節水ハウス内の最適な温度・湿度を調整するための新たな空調技術の提案を行った。次に、ハウス内の熱収支・水収支モデルを構築し各空調要素を変化させた場合のハウス内の環境変化をシミュレーションで検証した。さらに、節水ハウスが省エネルギーかつハウス内の水分ロスが最少となる空調設備の最適な組み合わせを、ハウス内の定常モデルに基づいた制約条件と目的関数を基に最適化計算を実施しその有効性を評価した。



**Fig. 2** The air-conditioning system of the energy-efficient and water-saving plant factory

## 2. 省エネルギー型節水ハウスの実現のための空調技術の提案

### 2.1 従来までの空調システムの概要

節水ハウス内の温度管理を考える場合、外気から熱が流入する要素としては、太陽熱、壁面・床面の熱貫流、外気の送風および室内空気の排出が、また、ハウスの冷却要素としては、冷房などの冷熱供給器、ハウス内の空気の排気、気化熱を利用した細霧冷房、パッドアンドファン、地下水温などが挙げられる<sup>4)</sup>。冷熱供給器は最も有効的な手段であるものの、日中はエネルギーの負荷が大きく経済的に不利である。細霧冷房は、噴霧された霧が蒸発する気化熱で気温を低下させる省エネルギー型の冷却方法である。しかし、気温の低下と同時に相対湿度が上昇するため通常は水蒸気の室外への換気が必須となる。パッドアンドファンは、温室側壁部分に水を湿らせたパッドを取り付け、反対側に設置したファンにより外気がパッド通過する際に気化冷却されそれが室内に送る方法である。この場合

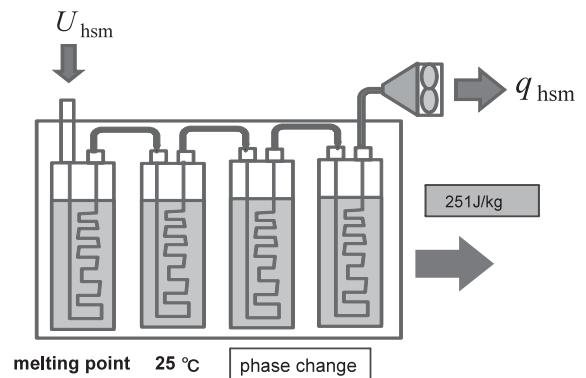
もハウス内の相対湿度は上昇する。

### 2.2 新たな空調技術の提案

今回は省エネルギー型の節水ハウスの実現を目的としているため、水分の外気へのロスを抑え可能な限り抑制する閉鎖空間を維持した状態でハウス内の空調を管理しなければならない。ここでは、さらに以下の省エネルギー型の空調要素を提案した。

#### (1) 中高温度の潜熱蓄熱材による冷熱供給

潜熱蓄熱材は、物質の相変化において出入りする熱を利用し外部環境からの熱の貯蓄・放出する物質で、単位容積あたりの蓄熱量が大きいことが特徴である<sup>5)</sup>。例えば水は1 kgあたり333.5 kJの熱を貯留し、凝固（氷結）でその熱を放出するが、零度以下の蓄熱には冷却エネルギーが必要となる。今回は氷の潜熱量よりも劣るが中高温範囲に融点を持つ熱蓄熱材を用いることで省エネルギー化を図った。すなわち、夜間の外気温（10℃前後）で冷熱を蓄熱し、日中40℃前後の外気温中でそれが融解する際の熱エネルギーがハウス内の栽培温度範囲（30℃前後）の維持に利用される。熱の取り込みは、**Fig. 3** に示すように潜熱蓄熱材を詰めた容器内部に銅管を巻き、そこにハウス内空気を送風することで、相変化時の融解潜熱の熱交換を行う。



**Fig. 3** The system by thermal storage material

#### (2) 太陽熱を利用した吸収冷凍機型除湿機

太陽熱を利用した吸収冷凍機型の除湿機を提案した。このシステムは **Fig. 4** に示すように吸収冷凍機部に太陽熱温水部と除湿部を付加したものである。

太陽熱温水部では、太陽熱により吸収冷凍機部内の溶媒をガス化するための温熱を供給する<sup>1)</sup>。吸収式冷凍機部は、圧縮式冷凍機の圧縮機に代わりに冷媒（水）と溶媒（アンモニア、臭化リチウムなど）の二つの物質を組合せた溶液を循環させることで冷熱供給を行う化学的な方法である<sup>6)</sup>。除湿部では図に示すように冷凍機内部に金属板を埋め込み、そこに冷凍機上部からハウス内の湿った空気を送風することで、それが金属板と接触し表面が結露することで除湿が行われ

る。このシステムでは電力がわずかなうえ太陽熱が利用できるため省エネルギー化に有効である。なお、この吸収冷凍機はハウス内の冷熱供給にも有効である。

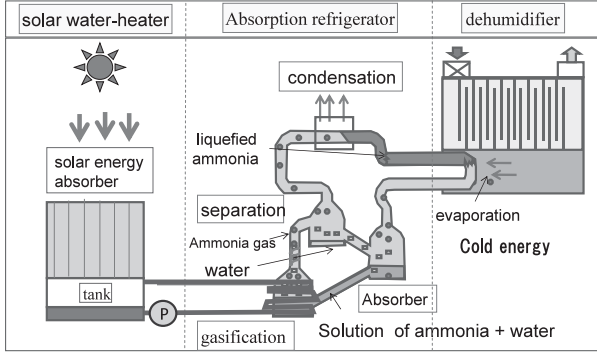


Fig. 4 The system of the absorption refrigerator with dehumidification ability

### (3) 冷凍法による塩分除去の氷冷熱利用

乾燥地域における水の塩害対策に対し、冷凍法による塩分除去システムを提案している<sup>7)</sup>。このシステムは水が凍結する際に含有不純物を排除する性質を利用し水を浄化するもので、分離した水はハウス内の散水として同時に得られた氷冷熱は空調の冷熱源として利用できる。中東諸国など冷熱需要が大きい地域における生活排水処理エネルギーの有効利用としても開発が進められている。

### (4) 除湿機

節水ハウスでは、植物の葉からの水分の蒸散や細霧冷房などで上昇するハウス内の湿度管理として、室内換気を安易に行うことができない。そのため、除湿機の稼働により水分量の調整が重要となる。除湿機の消費電力は冷房装置と比べ小さいため、太陽熱発電の利用等で省エネルギー化を図ることも可能である。

## 3. 節水ハウス内の数学モデル

### 3.1 ダイナミックモデルの構築

提案した節水ハウス内空調システムの熱量収支及び水分量収支モデルを構築した (Fig. 5)。まず、節水ハウス内の熱量収支は(1)式で表される<sup>4)</sup>。なお、今回は植物の呼吸熱は微量のため無視するとし、空気内の水分の凝固熱についても全て吸収冷凍機及び除湿機内で処理されると考えた。

$$\begin{aligned} \rho V_v C_p \frac{dT_v}{dt} = & C_p \rho U_o T_o - C_p \rho U_v T_v \\ & + q_{sun} + q_w + q_g - q_{acn} - q_{hsm} \\ & - q_{mst} - q_{plt} - q_{ice} - q_{ref} \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 $T_v$ (°C)、 $T_o$ (°C) はハウス内及び外気温度を、 $V_v$ ( $m^3$ )、 $\rho$ ( $kg/m^3$ )、 $C_p$ ( $J/kg/K$ )はハウス容積、

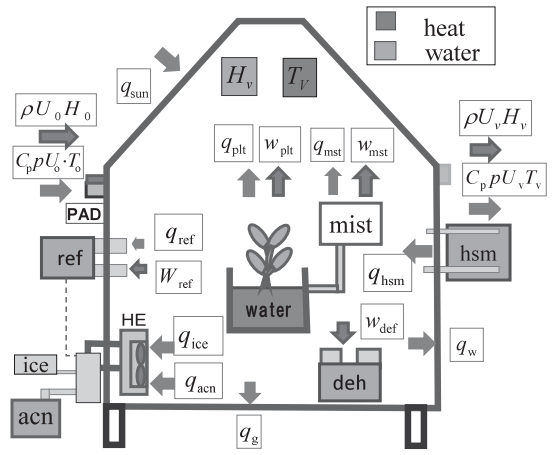


Fig. 5 The mathematical model of the air-conditioning system in the energy-efficient and water-saving plant factory

大気密度、大気比熱、そして、 $U_o$ ( $m^3/s$ )、 $U_v$ ( $m^3/s$ ) は外気通気速度、ハウス内空気排気速度を示す。また、 $q_{sun}$  (W)、 $q_w$  (W)、 $q_g$  (W)、 $q_{acn}$  (W)、 $q_{plt}$  (W)、 $q_{mst}$  (W)、 $q_{hsm}$  (W)、 $q_{ice}$  (W) は、それぞれ、太陽光、壁面、床面、冷熱供給機、植物の蒸散熱、細霧冷房による気化熱、潜熱蓄熱材、塩分除去プロセスからの熱流量を表し、これらは次式より求められる。

$$q_{sun} = C_{sf} \cdot \Phi_{sun} \cdot S_{rf} \quad (2)$$

$$q_w = a_w \cdot S_w (T_o - T_v) \quad (3)$$

$$q_g = a_g \cdot S_g (T_o - T_v) \quad (4)$$

$$q_{plt} = w_{plt} \cdot r \cdot S_{plt} \quad (5)$$

$$q_{mst} = w_{mst} \cdot r \quad (6)$$

$$q_{hsm} = m_{hsm} \cdot r_{hsm} \cdot R_{hsm} \quad (7)$$

$$q_{ice} = m_{ice} \cdot (r_{ice} + C_w (T_v - 0)) \quad (8)$$

なお、 $\Phi_{sun}$ ( $W/m^2$ ) は太陽の熱流束、 $C_{sf}$ (-)はハウス減衰係数、 $a_w$ ( $W/m^2/K$ )、 $a_g$ ( $W/m^2/K$ ) は外気とハウス壁面間、外気とハウス床間の熱伝達率、そして、 $S_{rf}$ ( $m^2$ )、 $S_w$ ( $m^2$ )、 $S_g$ ( $m^2$ )、 $S_{plt}$ ( $m^2$ ) は、ハウス屋根、壁面、床面、作物葉の面積を示す。 $r$ ( $J/kg$ )、 $r_{hsm}$ ( $J/kg$ )、 $r_{ice}$ ( $J/kg$ ) は水の蒸発潜熱、潜熱蓄熱材および水の融解潜熱、また、 $w_{plt}$ ( $kg/s/m^2$ )、 $w_{mst}$ ( $kg/s$ ) は単位時間・単位葉面積当たりの植物蒸散量、細霧冷房のミスト供給流量、さらに、 $m_{hsm}$ ( $kg/s$ )、 $m_{ice}$ ( $kg/s$ ) は、単位時間当たりに換算した潜熱蓄熱材及び塩分除去からの水の供給流量を示す。

最後に、 $q_{ref}$ (W) は吸収冷凍機からの冷熱流量を示し、その冷熱は太陽熱集光器から得られる熱流量  $E_{ref}$  (W) により冷凍機部内の溶媒がガス化することで供給される。供給流量は次式によって求められる。



$$q_{ref} = (\text{COP}_{ref}) \cdot E_{ref} = (q_{ref}/E_{ref}) \cdot C_{spnl} \cdot \Phi_{sun} \cdot S_{ref} \quad (9)$$

ここで、 $S_{ref}(\text{m}^2)$  は太陽集光熱面積、 $C_{ref}(-)$  は太陽熱集光器変換効率、 $\text{COP}_{ref}(-)$  は収冷凍機の成績係数（消費エネルギーあたりの冷却能力）を示す。

次に、節水ハウス内の水量収支は(10)式で表される。

$$\rho V_v \frac{dX_v}{dt} = \rho U_o X_o - \rho U_v X_v + w_{plt} + w_{mst} - w_{ref} - w_{def} \quad (10)$$

ここで、 $X_v(-)$ 、 $X_o(-)$  はハウス内空気および外気の絶対湿度を示す。 $w_{ref}(\text{kg/s})$ 、 $w_{def}(\text{kg/s})$  は、単位時間あたりに回収される吸収冷凍機と除湿機と水分量を示す。このうち、吸収冷凍機で除湿される水分量  $w_{ref}$  に関しては、ハウス内高湿度空気の吸収冷凍機への送り速度  $U_{ref}(\text{m}^3/\text{s})$  をもとに(11)式で表される。

$$w_{ref} = \rho \cdot U_{ref}(X_v - X_{ref})R_{ref} \quad (11)$$

なお、 $X_{ref}(-)$  は吸収冷凍機内の絶対湿度、 $R_{ref}(-)$  は吸収冷凍機の除湿効率を示す。

### 3.2 定常モデルによる温度、湿度の導出

定常状態におけるハウス内の温度  $T_v(\text{°C})$  は、(1)式の熱収支モデルの平衡条件 ( $dT_v/dt=0$ ) より得られる関係式を整理することで次式のように求められる。

$$T_v = \frac{(C_p \rho U_o + a_w S_w) T_o + a_g S_g T_g - \rho C_p U_{ref} T_{ref} + C_{cnst}}{C_p \rho U_v + a_w S_w + a_g S_g + m_{ice} C_w + \rho C_p U_{ref}} \quad (12)$$

$$(C_{cnst} = q_{sun} - q_{acn} - w_{mst} r + w_{plt} r S_{plt} - m_{hsm} r_{hsm} R_{hsm} + m_{ice} r_{ice})$$

一方、ハウス内の単位時間あたりに存在する水分量  $W_h(\text{kg})$  は(10)式の水収支式の定常モデル ( $dX_v/dt=0$ ) を整理することで  $\rho X_v$  を求め、これを次式に代入することで求められる。

$$W_h = (\rho X_v) V = \frac{w_{mst} + w_{plt} + \rho X_o U_o + \rho U_{ref} X_{ref} - w_{def}}{U_v + U_{ref}} V \quad (13)$$

ここで、 $X_{ref}(-)$ 、 $X_o(-)$  は吸収冷凍機内およびハウス外の絶対湿度を示しこれらは(14)、(15)式より求められる。

$$\begin{cases} X_o = 0.622 \cdot e_o^s \cdot \frac{H_o}{100} / \left( p - e_o^s \cdot \frac{H_o}{100} \right) \\ e_o^s = 6.1078 \cdot \exp\left( \frac{17.269 \cdot T_o}{T_o + 237.3} \right) \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} X_{ref} = 0.622 \cdot e_{ref}^s \cdot \frac{H_{ref}}{100} / \left( p - e_{ref}^s \cdot \frac{H_{ref}}{100} \right) \\ e_{ref}^s = 6.1078 \cdot \exp\left( \frac{17.269 \cdot T_{ref}}{T_{ref} + 237.3} \right) \end{cases} \quad (15)$$

なお、 $p$  は大気圧 (hPa)、 $T_o(\text{°C})$ 、 $T_{ref}(\text{°C})$  はハウス外及び吸収冷凍機内の温度、 $H_o(-)$ 、 $H_{ref}(-)$  はハウス内及び冷凍機内の相対湿度を示す。 $e_o^s(\text{hPa})$ 、 $e_{ref}^s(\text{hPa})$  は、ハウス外部と冷凍機内の飽和水蒸気圧を示す。

最終的にハウス内相対湿度  $H_v(-)$  は、(16)式のハウス内水蒸気圧  $e_v(\text{hPa})$  を基に(17)式より求められる。

$$e_v = p X_v / (X_v + 0.622) = \frac{p \cdot W_h}{W_h + 0.622 \rho V} \quad (16)$$

$$H_v = 100 \cdot \frac{e_v}{e_v^s} = \frac{100 \cdot p \cdot W_h}{(W_h + 0.622 \rho V) \cdot 6.1078 \cdot \exp(17.269 T_v / (T_v + 273.3))} \quad (17)$$

## 4. 最適化手法を用いたハウス内空調設備の最適設計

前章で導出した定常状態モデル式を基に、各空調要素を変化させた場合のハウス内の環境変化を評価することは可能であるが、ここでは各空調設備の最適な組み合わせを最適化手法より求めることとした。計算においては制約条件と目的関数が選定されるが、その際ハウス内の水の損失量  $W_{obj}(\text{kg})$  と空調で使用する機器の消費エネルギー  $E_{obj}(\text{kJ})$  を求める必要がある。

### 4.1 水の損失量と機器消費エネルギーの導出

まず、着目する時間  $h_s$  当たりのハウス内水分ロス  $W_{los}(\text{kg})$  は、(13)式のハウス内水分及び排気水分より次式で求められる。

$$W_{los} = (\rho U_v H_v - \rho U_o H_o) \cdot h_s = \left( \frac{U_v \cdot W_h}{V} - \rho U_o X_o \right) \cdot h_s \quad (18)$$

次に、空調設備の消費エネルギーを求める。ここでは、特に高い消費エネルギーを示す冷熱供給設備、除湿機、一部電力を利用を想定した太陽熱利用型吸収冷凍機に関する電力量を考慮することとした。冷熱供給装置の時間  $h_s$  当たりの消費電力量  $E_{acn}(\text{kJ})$  は、冷熱供給装置の成績係数  $\text{COP}_{acn}(-)$  から次式で求められる。

$$E_{acn} = \left( \frac{1}{\text{COP}_{acn}} \right) q_{acn} \cdot h_s = \left( \frac{1}{q_{acn}/E_{acn}} \right) q_{acn} \cdot h_s \quad (19)$$

同様に、除湿機の時間  $h_s$  の消費電力量  $E_{def}(\text{kJ})$  は、除湿機の消費電力  $P_{def}(\text{W})$  と時間当たりの水分回収

量  $a_{\text{def}}$  (kg/s), そして, その除湿量  $w_{\text{def}}$  (kg/s) から次式のように計算される。

$$E_{\text{def}} = \left( \frac{P_{\text{def}}}{a_{\text{def}}} \right) \cdot w_{\text{def}} \cdot h_s \quad (20)$$

さらに, 太陽熱利用型吸収冷凍機の消費電力  $E_{\text{ref}}$  (kJ) は(2)式により算出される。ここでは, 先同様吸収冷凍機の消費電力  $P_{\text{ref}}$  (W), 時間当たりの水分回収量  $a_{\text{ref}}$  (g/s), 単位時間に送られる空気量  $U_{\text{ref}}$  (W) より算出される電力に, 冷凍機除湿部内で結露による発生する凝縮熱量の冷却電力分を加えることで消費電力が求められる。

$$E_{\text{ref}} = \left\{ \left( \frac{P_{\text{ref}}}{a_{\text{ref}}} \right) U_{\text{ref}} + \frac{r}{\text{COP}_{\text{ref}}} w_{\text{ref}} \right\} R_{\text{Eref}} \cdot h_s \quad (21)$$

なお,  $R_{\text{Eref}}(-)$  は吸収冷凍機の稼働における太陽熱量が与える熱量割合を示し, 全て太陽熱で稼働する場合当然電力は必要としない。

## 4.2 制約条件の設定

最適設計の計算で着目するハウス内環境要素  $x$  には, 以下に示す操作変数や環境変数を選定した<sup>8)</sup>。また, 制約条件のうち不等式制約については, これらの各状態および操作変数の栽培環境などに基づいた最大最小値を考慮することとした。

$$\mathbf{X} = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6 \ x_7 \ x_8]^T \\ = [q_{\text{acn}} \ U_0 \ U_{\text{ref}} \ w_{\text{mst}} \ w_{\text{def}} \ m_{\text{hsm}} \ T_v \ H_v]^T \quad (22)$$

$$\mathbf{x}_{\text{min}} < \mathbf{x} \leq \mathbf{x}_{\text{max}} \quad (23)$$

次に, 等式制約式については, 前章で求めた熱量収支式・水分量収支式の定常モデルを用いた。これらは, (12)-(17)式に示される温度, 湿度などの関係式を整理することで次式のような等式制約が得られる。

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{X} = \mathbf{C} \quad (24)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -1 & -C_p \rho T_0 & 0 & -r_{\text{hms}} R_{\text{hms}} & A_{16} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e_v^s \\ 0 & -\rho X_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & W_v & -V & V & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$(A_{16} = a_w S_w + a_g S_g + C_p \rho U_0 + m_{\text{ice}} C_w + \rho C_p U_{\text{ref}})$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} -a_w S_w T_0 - a_g S_g T_g - q_{\text{sun}} + w_{\text{pit}} r + m_{\text{ice}} r_{\text{ice}} \\ 100 \\ w_{\text{pit}} V + \rho X_{\text{ref}} \\ 0 \\ -273.3 \ln(e_v^s) / (\ln(e_v^s) - 6.108 \cdot 17.27) \end{bmatrix} \quad (26)$$

## 4.3 一元化した目的関数の提案

今回の目的関数の設定では, 空調設備の省エネルギー化と節水ハウス内の水ロスの最小化をどのように評価するかが問題となる。この場合, 目的関数に消費電力 (kJ) のみを考慮するとハウス内の熱を積極的に排気することになり水分ロスが増加し, 逆に水分ロス (kg) のみを目的関数に考えるとハウス内の閉鎖状態を維持するために冷熱供給装置の消費電力が増加することになる。ここでは, 幾つかの試行の後, 外気に損失する水分量を吸収冷凍機で回収しハウス内に戻す分の電力に置き換えることで目的関数を全て電力 (kJ) に一元化することを考えた。この場合, 最終的な目的関数は以下のようになり, これを最小とする操作変数  $x$  の組み合わせが求められる。

objective function

$$\begin{cases} \min f(x_i) = E_{\text{acn}} + E_{\text{ref}} + E_{\text{los}}(W_{\text{los}}) \\ = \left\{ \frac{q_{\text{acn}}}{\text{COP}_{\text{acn}}} + \frac{P_{\text{def}} \cdot w_{\text{def}}}{a_{\text{def}}} + \frac{P_{\text{ref}} \cdot U_0}{a_{\text{ref}}} + \frac{r \cdot W_{\text{los}}}{\text{COP}_{\text{ref}}} \right\} h_s \end{cases} \quad (27)$$

## 5. シミュレーション及び最適化計算

### 5.1 シミュレーション条件

前章までの仮定に基づき, 空調設備の最適な組み合わせについてのシミュレーション及び最適化手法による計算を実施した。まず, 本研究の最終的な目的となる節水ハウスによる作物の栽培条件は下記のようなものを想定する。

- ・栽培方法: 養液栽培 (水耕栽培), 節水栽培。
- ・作物目: 葉菜類を前提とするが, 将来的には果菜類を対象。
- ・栽培目的: 当面は設備投資額の大きさから付加価値の高い植物の生産に限られるが, 将来水不足が心配される地域の食料確保が前提。
- ・ハウス材質: 耐環境性能及び断熱性が高い鉄骨ガラスハウス。
- ・ハウスサイズ: 栽培試験では  $10 \text{ m}^2$  程度だが, 段階的に  $50 \text{ m}^2$ ,  $100 \text{ m}^2$  へと拡大。
- ・外部環境: 半乾燥地帯, 乾燥地農業を想定。

**Table 1** にはこのシミュレーションに用いた各条件を示す。このシミュレーションで想定したハウスのサイズは実装中の空調設備を備えた節水ハウスに合わせ約  $5 \text{ m}^2$  程度の小さいサイズを考えた。作物の蒸散量など数学モデルの各定数値は, 現在運転稼働中である栽培ハウス (方法: 養液栽培, 品目: トマト, キュウリなど果菜類, ハウスサイズ: 約  $50 \text{ m}^2$ ,  $100 \text{ m}^2$ ) の環境条件より算出した。**Table 2** には, 最適化手法の

不等式制約条件となるハウス内の状態量の上下限値を示す。これらは想定した節水栽培条件に基づいており、例えば外気温度約 40℃ に対するハウス内の温度は 20℃ 以上 35℃ 以下、その相対湿度は 80% 以上 85% 以下と設定した。また、潜熱蓄熱材には、 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  を用いることを想定しその蓄熱量を使用した。吸収冷凍機の冷媒にはアンモニアを考えた。太陽熱温水器から 85℃ 以上の温水が得られれば冷凍機は稼働するため、気温 35℃ の環境で太陽熱温水器より得られる温水温度を 70℃ 程度とし、残りは電力で補うことを想定した ( $R_{\text{Eref}}=0.3$ )。

**Table 1** The explanation of the character expressions and the invariables

Symbol	Values	Unit	Symbol	Values	Unit
$a_f$	5.8	[W/(m <sup>2</sup> K)]	$\Phi_{\text{sun}}$	1,370	[W/m <sup>2</sup> ]
$a_w$	5.8	[W/(m <sup>2</sup> K)]	$H_o$	20	[%]
$a_g$	5.8	[W/(m <sup>2</sup> )]	$T_{\text{ref}}$	15	[°C]
$C_p$	1.006	[J/(kgK)]	$w_{\text{def}}$	0.31	[g/s]
$C_w$	4.217	[J/(kgK)]	$W_{\text{plt}}$	0.035	[kg/s/m <sup>2</sup> ]
$p$	1.013	[hPa]	$W_{\text{def}}$	0.40	[kg/s]
$\rho$	1.29	[kg/m <sup>3</sup> ]	$h_s$	8	[hour]
$r$	2.257	[J/g]	$\text{COP}_{\text{ref}}$	1.2	[-]
$r_{\text{ice}}$	335	[J/g]	$\text{COP}_{\text{acn}}$	5.0	[-]
$r_{\text{hsm}}$	230	[J/g]	$S_w$	19.55	[m <sup>2</sup> ]
$C_{\text{plt}}$	3	[-]	$S_g$	2.99	[m <sup>2</sup> ]
$R_{\text{ref}}$	1	[-]	$S_{\text{pad}}$	0.09	[m <sup>2</sup> ]
$R_{E_{\text{ref}}}$	0.3	[-]	$P_{\text{def}}$	200	[W]
width	2.3	[m]	$P_{\text{ref}}$	100	[W]
depth	1.3	[m]	$U_{\text{ref}}$	0.01	[m <sup>3</sup> /s]
height	2.3	[m]	$C_{\text{spnl}}$	0.5	[-]

**Table 2** The simulation conditions of inequality constraint

symbol	values	unit	symbol	values	unit
$q_{\text{acn\_min}}$	100	[W]	$q_{\text{acn\_max}}$	2000	[W]
$U_{\text{out\_min}}$	0.01	[m <sup>3</sup> /s]	$U_{\text{out\_max}}$	0.1	[m <sup>3</sup> /s]
$U_{\text{ref\_min}}$	0.01	[m <sup>3</sup> /s]	$U_{\text{ref\_max}}$	0.05	[m <sup>3</sup> /s]
$w_{\text{mist\_min}}$	0	[-]	$w_{\text{mist\_max}}$	1	[-]
$w_{\text{def\_min}}$	0	[-]	$w_{\text{def\_max}}$	1	[-]
$M_{\text{hsm\_min}}$	80	[kg]	$M_{\text{hsm\_max}}$	120	[kg]
$T_{\text{min}}$	20	[°C]	$T_{\text{max}}$	35	[°C]
$H_{\text{min}}$	70	[%]	$H_{\text{max}}$	90	[%]

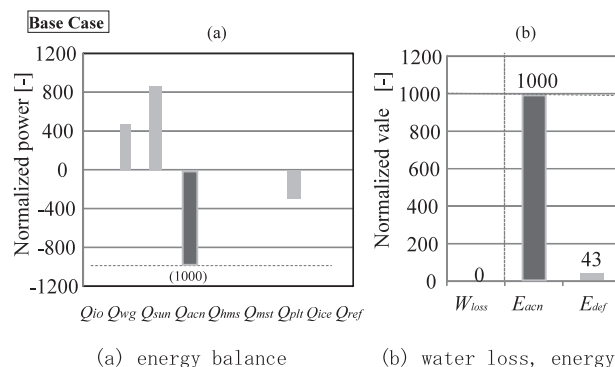
## 6. シミュレーション結果及び考察

### 6.1 各環境要素の影響

シミュレーションでは、先ず導出した定常モデルに基づき各種空調設備の組み合わせを変化させた場合の影響を調べた。

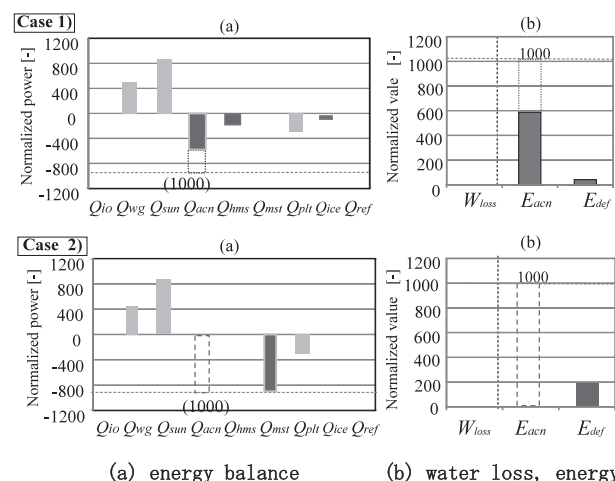
**Fig. 6** には、ハウス内空気の外気への排気を 0 とし、冷却には最も消費電力の高い冷却装置のみを使用した場合（植物の蒸散熱は除く）の結果を示している。図 (a) には、定常時間におけるハウス内各要素の熱量を

示している。 $Q_{i.o}$ ,  $Q_{w.gl}$ ,  $Q_{\text{sun}}$ ,  $Q_{\text{acn}}$ ,  $Q_{\text{hsm}}$ ,  $Q_{\text{mst}}$ ,  $Q_{\text{plt}}$ ,  $Q_{\text{ice}}$ ,  $Q_{\text{ref}}$  は、それぞれハウス吸気排気、壁面及び地面、太陽熱、冷熱供給、潜熱蓄熱材、細霧冷房、植物蒸散、塩分除去による水冷熱、吸収冷凍機による熱量を示す。図 (b) には定常時間当たりのハウス内の水分ロス量、冷却装置と除湿機の使用電力量を示している。シミュレーションでは最も使用電力が高いこの条件をベースケースと考え、以下各空調設備要素の組み合わせを変化させた場合の熱量、消費電力、水分損失の増減を比較した。



**Fig. 6** Simulation results 1 (base case)

**Fig. 7** には、潜熱蓄熱材および・塩分除去の水冷熱を利用した場合 (Case 1) と、細霧冷房の利用によってハウス内の環境調節を行った場合 (Case 2) の結果を示している。これによると、Case 1) では潜熱蓄熱材と水冷熱を利用することで、ベースケースと比較してハウス内の水分ロスを抑えた状態で使用電力を 40% ほど低減できていることが分かる。これは、これらの設備要素は電力使用の増加や水の損失を招かないためであり、これら設備の初期投資の有効性が窺える。一方、Case 2) によると、水の気化熱の利用する細霧冷房は、電力使用を 5 分の 1 程度に低減できるなどハウス内の冷却方法としては有効であることが認



**Fig. 7** Simulation results 2 (case 1), case 2))



識される。しかし、節水を目的とするこのケースでは、ミストに伴ない増加したハウス内の水分を排気ではなく除湿機で回収する必要があるため、除湿機による電力使用の増加が見られる。

一方、Fig. 8には通常の栽培で行われる細霧冷房とハウス換気を併用した場合 (Case 3) と、外気取り込みにパッドアンドファンを利用した場合 (Case 4) の結果を示している。これによると、Case 3)のように細霧冷房と換気を並行した場合、増加したハウス内水分を除湿機を使用せずに低減できるため、電力使用を最小に抑えるには効果的な方法であるが、ハウス内換気による水分損失が増大してしまうため、節水を目的とする場合にはやはり換気を最小限に抑え除湿機による水分除去を選択することが不可欠となる。また、Case 4)に示すパッドアンドファンを利用した場合、ハウス内に流入する空気が水の気化熱により冷却されているため、冷却機の使用電力をある程度低減するなど温度管理には有効であるが、この場合も先同様パッドアンドファンで送風されるより高湿度の水分を取り除くためさらに除湿機の使用電力が増加するなどこの手法が節水ハウスでは必ずしも有効でないことが窺える。

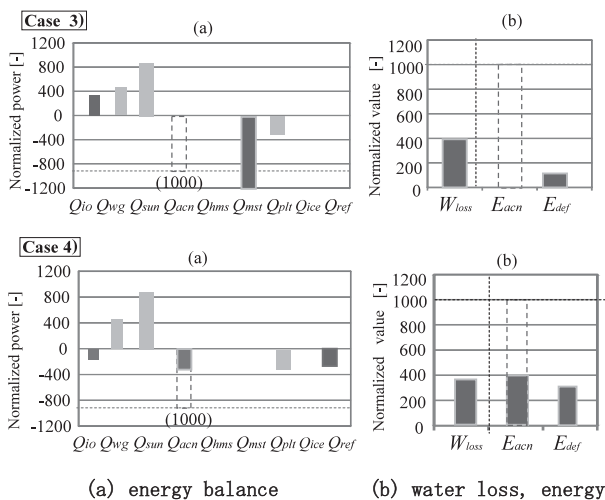


Fig. 8 Simulation results 3 (Case 3, Case 4)

## 6.2 最適化手法を用いた最適設計

最後に、最適化手法を用い空調システムの最適な組み合わせを検討した。Fig. 9には、最終的に提案した目的関数の利用した場合に得られた空調システムの調整結果を示している。これによると、ハウス内の水分ロスを抑えた状態で使用電力も最小となるような空調設備の組み合わせが達成できていることが分かり、提案した手法の有効性が示唆された。この場合、

冷却機と除湿機でハウス内空調を調節したベースケースと比べると、消費電力量が大幅に削減されてい

ることが分かる。これは、潜熱蓄熱材、太陽光利用型吸収冷凍機型除湿機、塩分除去による氷冷熱の組み合わせが、ハウス内冷却の省エネルギー化を可能にしていることを意味している。特に、潜熱蓄熱材のように初期コストのみで稼働エネルギーをあまり必要としない環境調整要素は節水ハウスの省エネルギー化には不可欠であると考えられる。また、節水に関しては、細霧冷房や作物の蒸散で増加したハウス内水分を排気によってロスすることを最小限とするために除湿機の利用は避けられないが、この場合も太陽熱を利用した吸収冷凍機除湿機の利用は、省エネルギー効果も大きくこのシステムには有効であることが分かる。これらの状況から、提案した環境調整要素を用いることで、当面は付加価値の高い植物や薬剤成分が前提にはなるものの、将来的には将来水不足が心配される地域の食料確保への利用の可能性があるものとする。

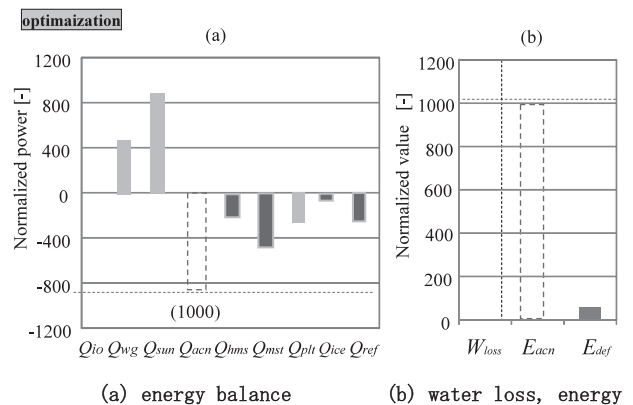


Fig. 9 Simulation results 4 (optimization method)

## 7. おわりに

気候変動に伴う持続可能な水資源、特に農業用水の確保を目的に、半乾燥地における省エネルギー型の節水植物工場を実現するための最適な空調設備の組み合わせ検討した。本研究で得られた結果を以下に示す。

- 1) ハウス内の環境を作物にとって最適な温度・湿度に維持するための空調設備として提案した潜熱蓄熱材、塩分除去による氷冷熱、太陽熱利用吸収冷凍機型除湿機は、それぞれ節水・省エネルギーにおいて有効性であることが確認できた。
- 2) ハウス内の水分ロスと使用電力を最小とするために、水のロスを吸収冷凍機電力に置き換えることで電力に一元化された目的関数を提案しこの系の最適設計を行った。その結果、ハウス内の水分ロスを抑えた状態で使用電力も最小となるような空調設備の組み合わせが達成できた。調整されたシステムでは、冷却供給装置と電気稼働の除湿機のみによって環境を制御した場合

と比較し、水分ロスを抑えた状態で使用電力を大幅に削減することが可能となり、提案手法の有効性が示唆された。

本報では提案する節水ハウスの空調システムに対する基本設計指針や最適化手法の提案を行ったが、今後は、設計した空調システムの実装、並びにその条件下での作物栽培試験による節水栽培の有効性の評価、すなわち、植物育成に重要な外部環境因子（温度、湿度、光、空気環境、養液条件など）に関する作物への影響評価を行う所存である。

## 謝 辞

この研究は、JST 戦略的創造研究推進事業 (CREST) : 持続可能な水利用を実現する革新的な技術とシステム領域 : 「超節水精密農業技術の開発」の助成を受けたものである。ここに関係者各位に謝意を表する。

## 参 考 文 献

- 1) 山本博巳, 矢田 尚, 中村正和, 山地憲治: 仮想エネルギーの概念を用いた物質フロー分析, エネルギー・資源学会誌, Vol. 31, No. 1, pp. 1-9 (2010)
- 2) 白石雅美: 沙漠を巡る諸問題-乾燥地農業の視点から, 熱帯農業, Vol. 47, No. 5, pp. 355-359 (2003)
- 3) A. Okazaki, Pat J.-F. Yeh, K. Yoshimura, M. Watanabe, M. Kimoto and T. Oki: Changes in Flood Risk under Global Warming Estimated Using MIROC5 and the Discharge Probability Index, Journal of the Meteorological Society of Japan., Vol. 90, No. 4, pp. 509-524 (2012)
- 4) 古在豊樹, 後藤英司, 富士原和宏: 「最新施設園芸学」, 朝倉書店, pp. 71-94 (2008)
- 5) 松岡秀男: パラフィン系潜熱蓄熱材と応用例の紹介, 冷凍, Vol. 85, No. 994, pp. 640-645 (2010)
- 6) 岡 雅博: 排熱利用吸収冷凍機の最近の進展, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 36, No. 1, pp. 19-22 (2008)
- 7) R. Fujioka, L. Pang Wang, G. Dodbiba and T. Fujita: Application of progressive freeze-concentration for desalination, Desalination, Vol. 319, No. 14, pp. 33-37 (2013)
- 8) 長尾智晴: 「最適化アルゴリズム」, 昭晃堂, pp. 36-45 (2000)

# The Optimum Design of the Air-conditioning System of a Plant Factory with a High-efficient Water Use in Arid Area by Computer Simulation

Seiji Matsuo<sup>1)†</sup>, Yotaro Hirako<sup>1)</sup>, Li Pang Wang<sup>1)</sup>, Toyohisa Fujita<sup>1)</sup>  
Yasunaga Iwasaki<sup>2)</sup> and Hiroki Umeda<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> Department of Systems Innovation, The University of Tokyo

<sup>2)</sup> Vegetable Production Technology Division, NARO Institute of Vegetable and Tea Science

<sup>3)</sup> Research and Development Department, Science Create Co., Ltd.

† Correspondence should be addressed to Seiji Matsuo :

(Department of Systems Innovation, The University of Tokyo

E-mail : matsuo@geosys.t.u-tokyo.ac.jp)

## Abstract

The authors designed the optimal air-conditioning system of the green house which minimizes the water and energy in an arid region by computer simulation. In this design, a heat balance model and water balance model in the green house were constructed and they were considered to be constrained conditions. Moreover, the objective function unified with electric power in a moisture loss and the electric power used was defined. Consequently, it was useful to introduce the fog cooling system, thermal storage mediums, ice from the desalination process and gas absorption refrigerator with dehumidification ability. It was suggested that drastic reduction of energies is possible by this air-conditioning system compared to conventional methods.

**Key words :** plant factory, high-efficient water, energy-saving, optimal design, air-conditioning system