

モデル予測制御器を用いた窓開度によるビニールハウス内飽差気温制御：  
モデル化誤差の異なるモデルに対する検証

中山 信<sup>\*1</sup>・中脇匠悟<sup>\*2</sup>・木村竜士<sup>\*1</sup>・大角理人<sup>\*1</sup>・高田 拓<sup>\*3</sup>

**Humidity deficit and air temperature control in greenhouse using a model predictive controller  
to open windows by degree : Inspection for models with different modeling errors**

Shin NAKAYAMA, Shogo NAKAWAKI, Ryushi KIMURA,  
Masato OHSUMI, and Taku TAKADA

**Summary**

Temperature-controlled automatic window devices are generally installed in greenhouses. However, in winter, when windows are opened due to temperature control, dry air easily flows into the greenhouse and plant pores close, which affects the growth of plants. Considering healthy plant growth, accurate control of air humidity and temperature is required. In this study, we created a 4-input 2-output model using the subspace method (N4SID) from the measured values of the greenhouse environment data. We created two models from two days of data with different temperature and humidity deficit differences inside and outside the greenhouse. We found that model reproducibility was partially satisfactory. Then, using the created models, we evaluated two of model predictive controllers. As a result, temperature inside the house met the target value, and the humidity deficit was controlled to approach the target value within the upper limit. When we performed model predictive control with controllers containing different modeling errors, the effect of the modeling errors was small on long time scale fluctuations. Finally, we revealed problems during actual operation and considered improvements for model predictive control.

1. はじめに

多くのハウス農家が設置している自動窓開閉器は、目標温度との差に対して段階的に窓を開けていく比例制御方式を採用している。これらの装置では、ハウス外が乾燥する冬期において、日中の日射量の増加に伴ってハウス内気温が上昇した際、気温を下げるために窓を開くと、乾燥した空気がハウス内に流れ込み、植物にとって乾燥しすぎた環境となる。一旦、乾燥しすぎると、葉の気孔が閉じ、その日の植物の生長が止まるおそれがある。近年の施設園芸において、ハウス内の乾燥度は、飽差という指標で示すことが一般的になっており、気温の上昇より飽差の上昇を防ぐことが光合成の促進につながるとされている<sup>1,2)</sup>。ハウス外の環境を考慮しながら、窓開閉によってハウス内の気温と飽差を同時に制御するためには、外環境の影響によるハウス内の気温と飽差の時系列変

---

\*1 高知工業高等専門学校 ソーシャルデザイン工学科 准教授

\*2 高知工業高等専門学校 ソーシャルデザイン工学科 5年生

\*3 東京都立産業技術高等専門学校 ものづくり工学科 准教授

化モデルが必要となる。この気温と飽差の時系列モデルを用いることにより、モデル予測制御が可能となり、気温と飽差の時間変化の予測と制御ができる。モデル作成に関して、ハウスの物理モデルは、多数の物理パラメータを設定する必要があるため、非線形システムとなり制御系設計が複雑になる<sup>3,4)</sup>。また、データドリブンモデリングでは、環境データを用いることでモデル自体は比較的単純な形式として導出可能である。ハウス環境のモデル例としては、線形 ARX (Auto-Regressive eXogenous) モデルなどを用いてハウス内気温を窓開閉によりモデル予測制御を行う手法<sup>5)</sup>や部分空間法 (N4SID法) モデルを用いて小型箱内の飽差と気温をファンやヒータ、加湿器によりモデル予測制御を行う手法などが報告されている<sup>6)</sup>。著者らは、春秋期における栽培下ハウスの実測値から線形 ARX モデルや OE (Output Error) モデルを用いて、ハウス外飽差 (あるいは気温) とハウス内日射量の 2 入力により、ハウス内飽差 (あるいは気温) の 1 出力モデルを高い精度で作成できることを示した<sup>7)</sup>。

本研究では、冬期の栽培下ハウスの実測値から部分空間法 (N4SID法) モデルを用いて、ハウス内飽差とハウス内気温の 2 出力モデルについて、ハウス外飽差とハウス外気温、ハウス内日射量、窓開度の 4 入力により作成することを試みた。ハウス内外の気温や飽差の状態が異なる 2 日間のデータから、2 つのモデルと対応するモデル予測制御器を作成し、各々の結果を評価した。

## 2. 実験環境

### 2.1 モデルベース制御による自動窓開閉システムの概要

本実験は、高知県安芸郡芸西村にあるピーマンのビニールハウス施設で行った。ハウスの形状は幅 5.5 m、奥行 16 m、高さ 3.4 m のカマボコ形である。ハウスに設置されている自動窓開閉装置は、図 1 に示すように、モータによるビニールの巻上げによって窓が開閉されるシステムであり、比例制御器によりハウス内の気温制御が行われている。図 2 に示すように、既設の自動窓開閉装置からモータ電源線を切り離し、開発した制御装置にモータ電源線を接続し、モデルベースコントローラによる自動窓開閉装置として機能を持たせる。



図1 ビニールハウスの外観

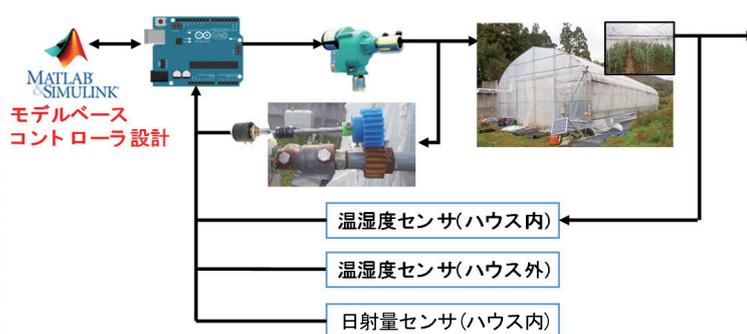


図2 モデルベース制御による窓開閉システムの概要図

### 2.2 計測ユニットの開発と設置

開発した計測ユニットを図 3 に示す<sup>8)</sup>。計測 BOX 内のセンサ用マイコンボード (Arduino Uno) と XBee 無線モジュールにより、センサデータを Zigbee 通信により無線送信する。日射量センサ (PVSS01)、温湿度センサ (SHT31) を用いた。なお、今回の実験では CO<sub>2</sub> (SCD30) センサのデータは使用しなかった。正確な温湿度を計測するためには、センサへの直射日光を避けて通風させる必要がある。そのため、温湿度センサは通風筒に入れ、DC ファン (San Ace 60) により通風させた。

図 3 の計測ユニットを利用したモデルベース制御システムを図 4 に示す。本計測ユニットを 2 台作成し、ハウス内外に設置した。また、ハウス外の計測ユニットには窓開度を計測するために、ポ

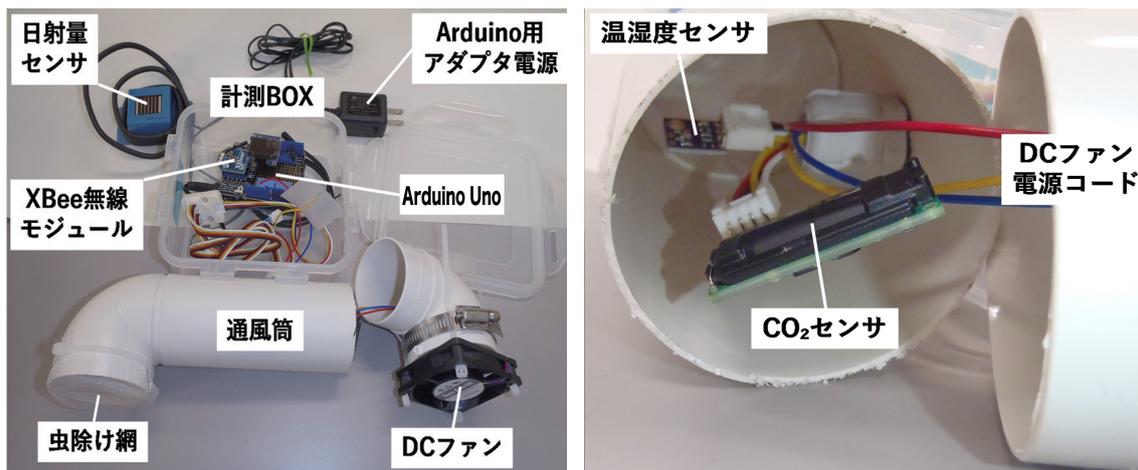


図3 計測ユニット外観（左）と通風筒内部（右）

テンショメータ信号電圧線を取り込んだ。ハウス内外の計測データを Zigbee 通信により PC に受信させ、時系列で CSV ファイルに保存した。モデルベース制御を実際に行う場合は、同時に Matlab/Simulink による制御プログラムを実行し、Arduino による窓開度モータ制御を行うことになる。

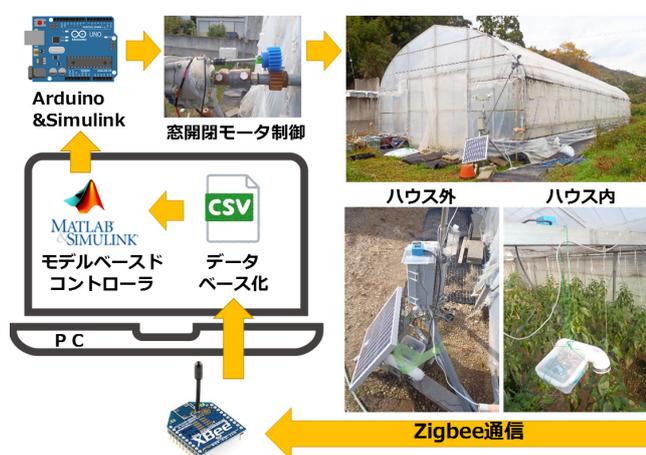


図4 計測ユニットによるモデルベース制御システム

### 2.3 飽差値の算出

飽差  $[g/m^3]$ とは、飽和水蒸気量  $[g/m^3]$ と絶対湿度  $[g/m^3]$ との差であり、空気中にどの程度の水蒸気が入る余地があるかを示す物理量である。施設栽培における一般的な適正飽差値は  $3 \sim 6 g/m^3$  程度であり、光合成による植物の生長が促進される。

飽差は、気温と相対湿度より算出する。気温  $T [^{\circ}C]$ での飽和水蒸気圧  $e [hPa]$ は、Tetens の近似式より次式で与えられる。

$$e(T) = 6.1078 \times 10^{\frac{7.5T}{T+273.2}} \quad (1)$$

飽和水蒸気量  $c [g/m^3]$ は、理想気体の状態方程式により以下のようになる。

$$c(T) = 217 \times \frac{e(T)}{T + 273.2} \quad (2)$$

飽差  $HD$  (Humidity Deficit)  $[g/m^3]$ は、飽和水蒸気量  $c [g/m^3]$ と相対湿度  $R [\%]$ より計算できる。

$$HD(T, R) = c(T) \times \frac{100 - R}{100} \quad (3)$$

温湿度センサで取得した気温と相対湿度の計測値から、飽差を算出した。

## 2.4 環境データの計測

2020年12月12日～15日にビールハウス施設で計測実験を行った。12日と15日は晴れであり、ハウス内の気温が上昇したため、既設の自動窓開閉器による窓開閉の動作が確認できた。他の2日は曇りであったため、ハウス内の気温上昇が小さく、窓開閉は行われなかった。今回、窓の開閉制御を行うモデル作成のため、窓開閉を実施した12日と15日のデータを用いた。

図5に、12日と15日の日中の環境データを示す。過去の研究ではハウス外日射量をモデル入力する例が多いが<sup>3-5)</sup>、ビニール越しに植物が受ける日射量に近いため、ハウス内日射量を用いた。比較観測では、ハウス外日射量はハウス内日射量の約2.5倍であった。15日の午後に気温が下がりだした後、15：40～16：00頃に急激な気温と飽差の上昇が見られるのは、ボイラーの発動による気温上昇である。モデル作成では、ボイラーの動作している時間帯は除いた。

ピーマンの生育適温は昼温27～28℃であるため、自動窓開閉器の開度設定は、目標値28℃、制御周期90秒で、1℃の気温差に対して窓開閉モータが一定量動く比例制御の設定となっている。しかし、今回開発した計測ユニットで12日と15日のハウス内気温を見ると、25℃程度で頭打ちとなっており、目標値28℃より低い気温で制御機能が働いていた。この自動窓開閉器の温度センサには、通風筒が無く、シリコン被膜のため、直射日光による蓄熱効果が発生し、実際より高温になっていると考えられる。また、12日12：00～13：00のハウス内飽差値は適正飽差値の6 g/m<sup>3</sup>を超えており、植物の気孔が閉じた可能性が懸念される。ハウス外気温は、12日は13℃～20℃であるが、15日は5℃～10℃とかなり低い。15日は内外の気温差が大きいいため、窓開度が小さいにも関わらず、窓を開けた際にハウス内気温が大きく下がっている。両日のハウス外相対湿度は50 %程度と低めであるが、15日はハウス外気温が低いため、ハウス外飽差は低くなり、ハウス内外で飽差値の差がほとんどない。

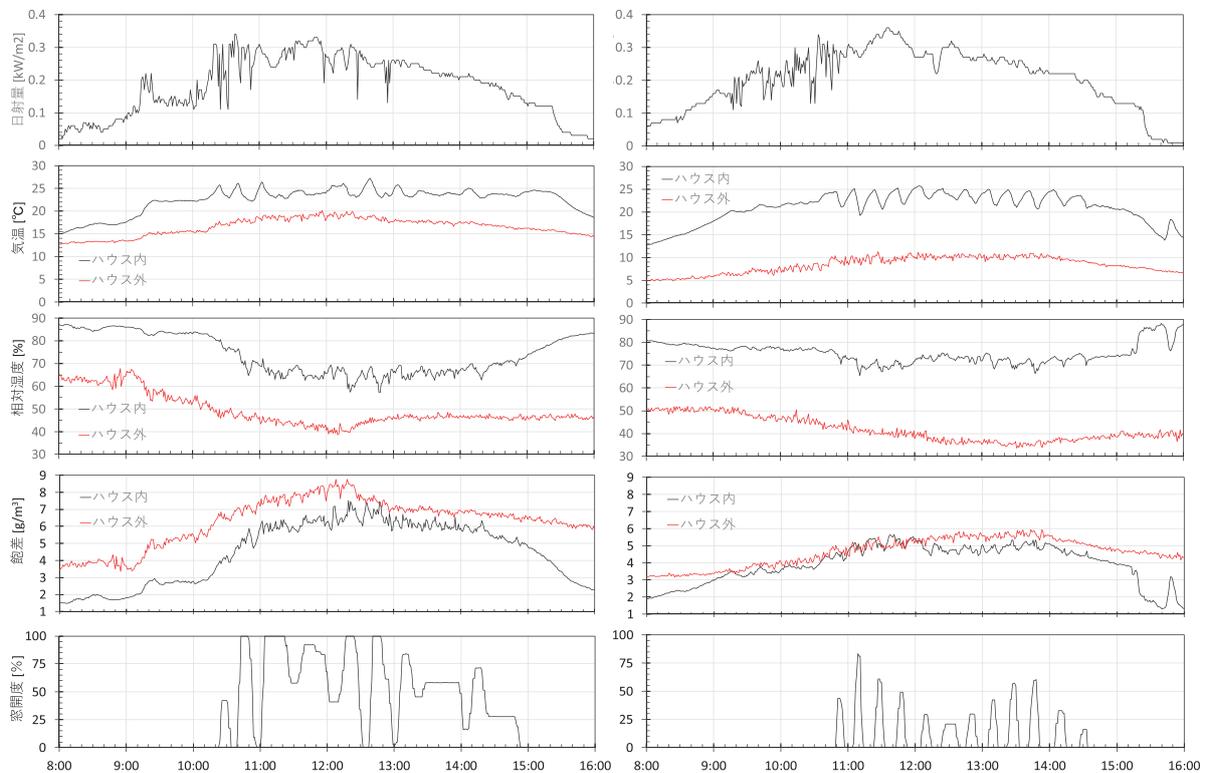


図5 2020年12月12日（左図）と15日（右図）の環境データ

### 3. ハウス内飽差気温モデル

#### 3.1 モデルの概要

モデルとしては、部分空間法により以下のような離散時間系の線形状態空間モデルを作成する。

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k) \\ \mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k) \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 $\mathbf{u}$  は入力、 $\mathbf{y}$  は出力、 $\mathbf{x}$  は状態変数である。ハウス内飽差気温モデルを作成する場合、1 分値の環境データを入出力データとして選定する。

$$\begin{cases} \mathbf{u} = [\text{ハウス外飽差} \ \text{ハウス外気温} \ \text{ハウス内日射量} \ \text{窓開度}]^T \\ \mathbf{y} = [\text{ハウス内飽差} \ \text{ハウス内気温}]^T \end{cases} \quad (5)$$

状態変数  $\mathbf{x}$  の次数は 3 段階とし、各々 3 次、6 次、9 次のモデルを作成した。使用するデータは、各日 8:00 での全てのパラメータの初期値を 0 とする変位データとする。(5) 式の入出力データから、 $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$ 、 $\mathbf{C}$  の行列を求めることで、数値モデルを作成する。

作成されたモデルを評価するために、モデルのシミュレーション出力値  $\hat{y}$  と実測値  $y$  との比較を行うが、今回はモデルの適合度である Fit 率を使用した。

$$\text{Fit 率} = \left( 1 - \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^N \{y(k) - \hat{y}(k)\}^2}}{\sqrt{\sum_{k=1}^N \{y(k) - \bar{y}\}^2}} \right) \cdot 100\% \quad (6)$$

ここで  $\bar{y}$  は実測値  $y$  の平均値である。(6) 式の右辺第二項は、RMSE (Root Mean Squared Error) を測定値の標準偏差で規格化した NRMSE (Normalized RMSE) である。

#### 3.2 モデルの作成と評価

12月12日の環境データからモデル作成を行った結果を図6に示す。12月12日の環境データに適用した検証結果として、飽差と気温を正確に再現できており、Fit率は80%程度と高い。12月15日の環境データに適用した場合は、ハウス内気温の変動パターンは概ね捉えられているが、飽差値の誤差は1~2 g/m<sup>3</sup>と大きい。いずれの次数モデルでもFit率は低く、特に飽差値のFit率は負の値となった。入力である12月12日の飽差値ではハウス内外の差が大きいため、ハウス外飽差がハウス内飽差に与える影響が大きかった。モデルと実測値とのFit率に関しては、ハウス内飽差では3次モデルの83.7%が高く、ハウス内気温では6次モデルの79.3%が高かった。ハウス内飽差と気温を合わせた平均Fit率は6次モデルの81.3%が最も高かった。モデル評価において、12月15日の環境データに適用した場合のFit率は、ハウス内飽差で9次モデルの-5.8%が高く、ハウス内気温では9次モデルの40.6%が高かった。ハウス内飽差と気温を合わせた平均Fit率は9次モデルの17.4%が最も高かった。高次のモデルである9次モデルのFit率が高い結果となった。

12月15日の環境データからモデル作成を行った結果を図7に示す。12月15日の環境データに適用した検証結果として、飽差と気温を正確に再現できており、Fit率は70%程度と高い。12月12日の環境データに適用した場合は、ハウス内飽差の変動パターンは比較的捉えられているが、ハウス内気温では差が5~10℃と大きい。ハウス内飽差のFit率は60%を超えるモデルもあったが、ハウス内気温のFit率は低く、負の値となった。2.4節で述べた通り15日は12日と比較してハウス内外の気温差が5~10℃程度大きいため、窓が開いた際のハウス外気温がハウス内気温に与える影響が大きかった。さらに窓開度の変動に伴うハウス内気温の変動の様子が測定値から見られており、モデル

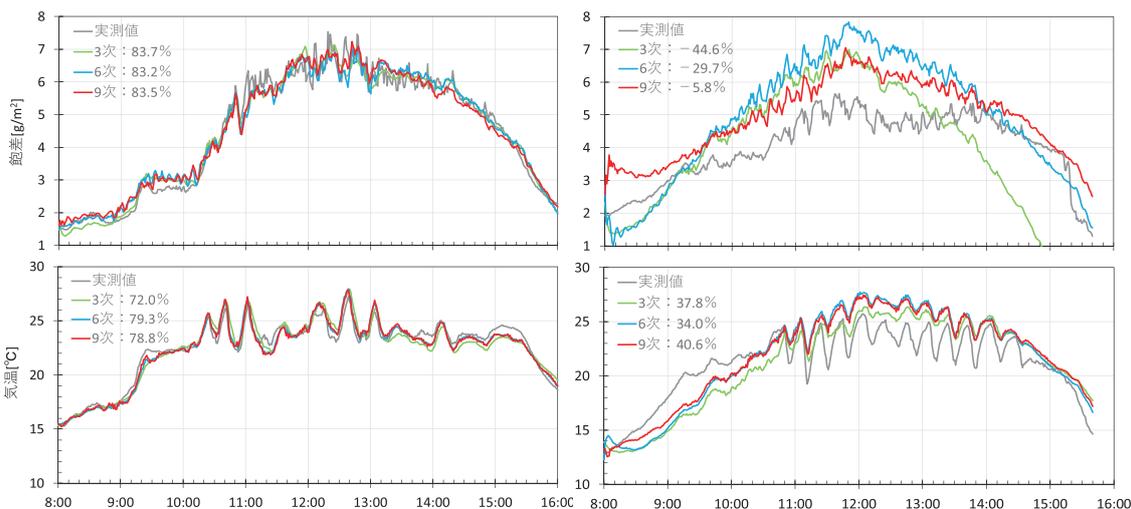


図6 12日環境データによるモデル：  
12日データに対する検証結果（左図）と15日データの評価結果（右図）

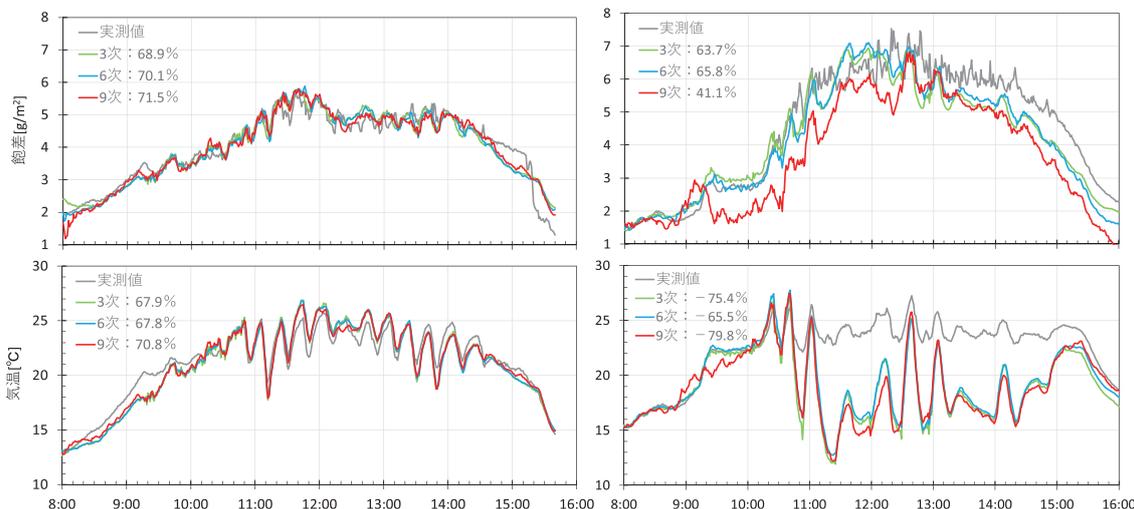


図7 15日環境データによるモデル：  
15日データに対する検証結果（左図）と12日データの評価結果（右図）

でも窓開度によるハウス内気温への影響が強くなった。モデルと実測値との Fit 率に関しては、ハウス内飽差で9次モデルの71.5%が高く、ハウス内気温では9次モデルが70.8%と高かった。ハウス内飽差と気温を合わせた平均 Fit 率は、9次モデルで71.2%が最も高かった。モデル評価において、12月12日の環境データに適用した場合の Fit 率は、ハウス内飽差で65.8%と6次が高く、ハウス内気温では-65.5%の6次が高かった。ハウス内飽差と気温を合わせた平均 Fit 率は、6次モデルの-0.2%が最も高かった。6次モデルの Fit 率が高く、必ずしも高次のモデルが高くない結果となった。

本モデルは、変位時系列データに対する線形モデリングであるため、飽差値や気温のハウス内外の差による影響は非線形効果として含まれる。このような非線形効果は、高次線形モデルであっても解消されないモデル化誤差となっている。個々のモデルに含まれるモデル化する際の誤差のことをモデル化誤差といい、このモデル化誤差に影響されにくいモデルにするためには、入力データとして多くの環境データを利用したモデル作成をすることや、入力パラメータを増やすことが考えられる。

## 4. モデル予測制御シミュレーション

### 4.1 モデル予測制御の概念

モデル予測制御は、各時刻で一定期間の未来に起こる応答をモデルで予測しながら最適化を行う制御方法である。モデル予測制御の概念図を図8に示し、アルゴリズムについて説明する<sup>9)</sup>。

- ① 現時刻を  $t$  として、 $[t, t + M - 1]$  の  $M$  ステップの区間で制御入力を  $\Delta u_f$  のように変化させたとき、過去の計測出力  $y_{MP}$  と過去の入力  $u_p$  の情報からモデルを使って出力軌道  $y_M$  を算出し、現在の計測出力  $y(t)$  とモデル出力の初期値  $y_{M0}$  の差を補正することで、 $[t + 1, t + P]$  の  $P$  ステップの区間における計測出力軌道  $y_P$  を予測する。
- ②  $P$  ステップの区間で予測された出力軌道  $y_P$  が目標値軌道  $r$  にできるだけ近づくように、また、 $M$  ステップの区間の入力変化  $\Delta u_f$  ができるだけ小さくなるように、 $u(t), u(t + 1), \dots, u(t + M - 1)$  の制御入力軌道が算出される。
- ③ 算出された制御入力軌道の1ステップ目である  $u(t)$  だけを、実際のシステムに加える。
- ④ 先のサンプル時刻へ移り、新たな計測出力  $y(t + 1)$  が得られた時、①に戻る。

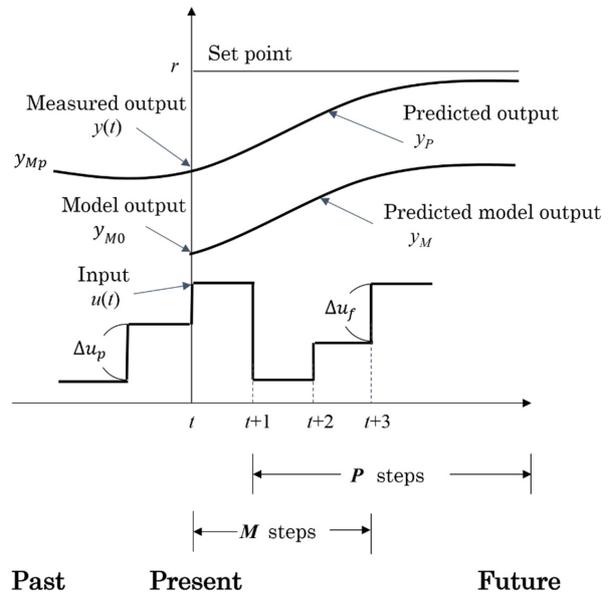


図8 モデル予測制御の概念図

モデル予測制御は、①～④の手順を繰り返すことで実行される。 $P$ ステップ区間を予測ホライズン (prediction horizon),  $M$ ステップ区間を制御ホライズン (control horizon) と呼び、サンプル時刻毎に①～④を繰り返す手法を moving horizon 法という。この手法では、評価関数  $J$  が最小になるように制御入力決定される。

$$J = (\mathbf{r} - \mathbf{y}_P)^T \mathbf{Q} (\mathbf{r} - \mathbf{y}_P) + \Delta \mathbf{u}_f^T \mathbf{R} \Delta \mathbf{u}_f \quad (7)$$

ここで、 $\mathbf{Q}$  は目標値誤差に対する評価関数の重みであり、 $\mathbf{R}$  は入力変化  $\Delta u_f$  を抑制するための制御入力に対する評価関数の重みである。

### 4.2 モデル予測制御シミュレーション

シミュレーションに使用するモデルは、平均 Fit 率の最も高い12月12日環境データによる6次モデルと、同じ次数モデルの12月15日環境データによる6次モデルとし、モデル予測制御コントローラを2つ設計した。実際上は、例えば、モデルベース制御器 (12月12日) を用いて、12月15日の実測値入力 (ハウス外飽差・ハウス外気温・ハウス内日射量) により、適切な制御入力 (窓開度) を調整して出力 (ハウス内飽差・ハウス内気温) する。今回はモデル化誤差が制御性能に与える影響を評価するために、モデルベース制御器 (12月12日) を用いて、12月12日データの実測値入力によるシミュレーションを別途実施した。

モデル予測制御コントローラ的设计として、ハウス内気温の目標値を27℃、ハウス内飽差の目標値を4.5g/m<sup>3</sup>、上限値を6g/m<sup>3</sup>と設定した。予測ホライズン  $P$  は、入出力システムの時定数に設定する 경우가一般的である。入力システムの時定数は、窓開度入力に対するハウス内飽差と気温の時間変化である10分程度と見られるため、予測ホライズンは時定数より少し大きめの  $P = 15$  とした。制御ホライズンは計算コストを抑えるために3ステップ程度にするのが一般的であるが、短時間での窓開度の激しい変化を避けるために、予測ホライズンの半分程度の  $M = 7$  とした。制御入力に対する評価関数の重み  $R$  は、大きい程窓開閉の動きを抑えることができるが、制御性が悪くなるため、 $R = 1$  とした。目標値誤差に対する評価関数の重み  $Q$  は以下のように設定した。

$$Q = \begin{bmatrix} 1(\text{飽差}) & 0 \\ 0 & 100(\text{気温}) \end{bmatrix}$$

飽差誤差の重みを気温誤差の重みと同程度にした場合、目標飽差を保持するために窓開度が抑えられた状態になる。しかし、日中のハウス内気温は28~29℃の高温になり、ハウス内飽差は目標値に近づく効果はあるが全体的な上昇は抑えられなかった。今回モデル作成に利用したデータでは、窓開度に対する応答性は気温の方が飽差より良い上に、気温の増減に伴う飽差の増減が起こるため、気温誤差の重みを大きくした方が窓開度制御による気温と飽差の調整が効くと考えられる。ただし、一度大きくした飽差値は中々減らすことが難しいため、環境データの日変化の違いによっては、飽差誤差の重みの重要性が大きくなる可能性はある。モデル作成に必要な入力データを増やす過程で、今後検討したい。

図9（左図）に、2つの予測制御器による12月12日のシミュレーション結果を示す。12月12日モデルベース制御器では、10：40~14：20まで目標値27℃とほぼ一致する窓開度が実現できている。

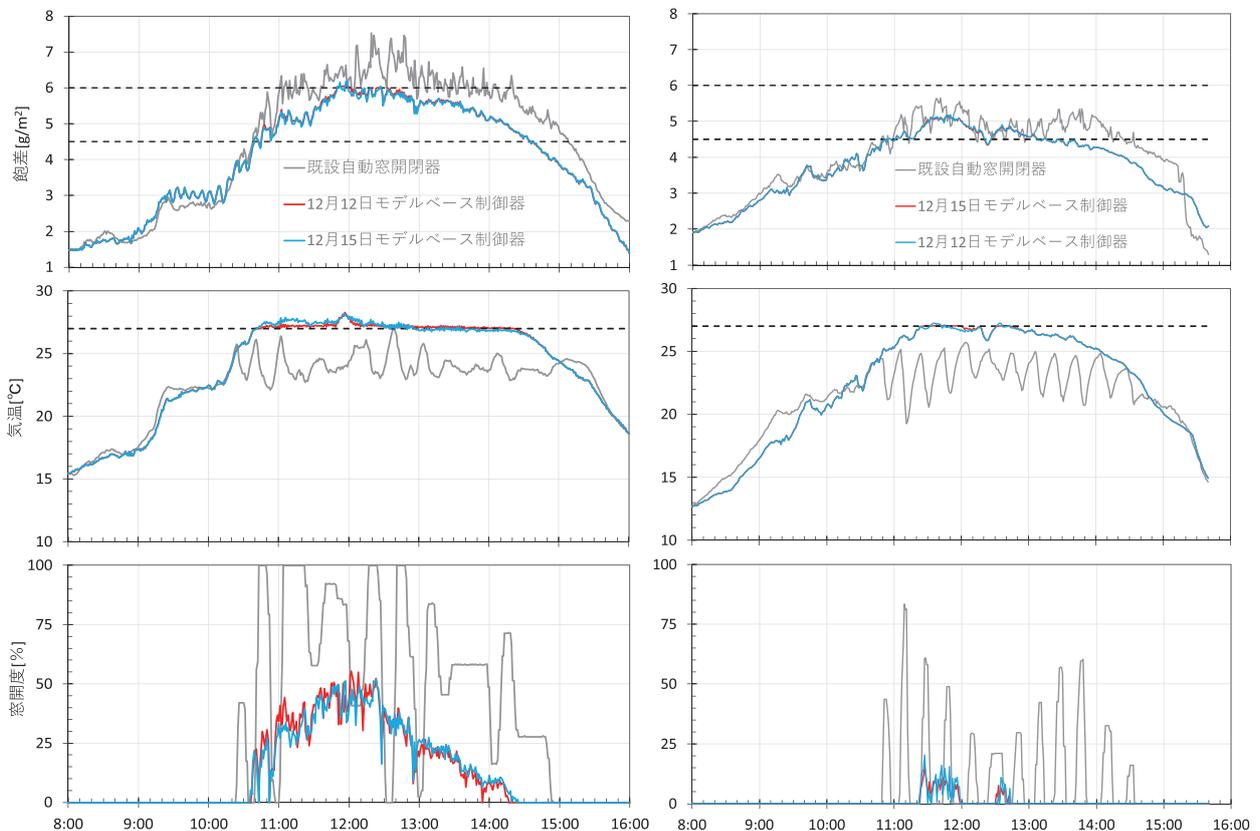


図9 モデル予測制御シミュレーション結果：12月12日（左図）と12月15日（右図）

ただし、11:50の27℃を超える気温上昇は、飽差が上限値 $6\text{ g/m}^3$ を超えないように窓開度を抑えたためである。12月15日モデルベース制御器では、窓開度に対するハウス内気温の減少幅の予測が実際より大きいため、与えた窓開度ではハウス内気温が十分に下がり切らず、11:00~12:00では目標値27℃から0.5℃ほど高く推移している。同様に、モデル化誤差による予測の違いから11:50には $6\text{ g/m}^3$ を $0.2\text{ g/m}^3$ 程度超えている。ただし、1日程度の長い変動に関しては、モデル化誤差が含まれない12月12日モデルベース制御器とほぼ同等の制御性能である。

図9（右図）に、2つの予測制御器による12月15日のシミュレーション結果を示す。12月15日モデルベース制御器では、11:20~12:50まで目標値27℃とほぼ一致する窓開度が実現できている。12:20に窓が全閉であるにも関わらずハウス内気温が突然27℃を下回るのは、図5（右図）より、この時間帯の日射量の急低下が原因と考えられる。12月15日は、ハウス外気温が低く、日中のハウス外飽差が $6\text{ g/m}^3$ を超えることがないため、ハウス内飽差は $6\text{ g/m}^3$ 以下で安定している。12月12日モデルベース制御器では、モデル自体の窓開度に対するハウス内気温の減少幅の予測が実際より小さいため、ハウス内気温は上がり切らずに、12:00において目標値27℃から0.2℃ほど低く推移している。ただし、1日程度の長い変動に関しては、モデル化誤差が含まれない12月15日モデルベース制御器とほぼ同等の制御性能である。

#### 4.3 シミュレーション結果の考察

今回、予測ホライズンと制御ホライズン ( $P, M$ ) の設定を (15,7) としたが、(100,50) や、(3,2) などに設定しても図9とほぼ同様の結果が得られた。出力予測の期間を、3~100分に変更しても制御性能は変わらなかった。ハウス内環境では、ハウス外飽差やハウス外気温、ハウス内日射量の1日を通した時間スケールの長い変化により、ハウス内飽差やハウス内気温の大まかな挙動が形成されるが、窓開度の局所的な速い変化は3分程度でハウス内飽差やハウス内気温を大きく変化させる。施設内での窓開閉による気温変化は時定数が10分程度であったため予測ホライズンを15ステップとしたが、灌水量など時定数が窓開閉より長く見込まれる場合には、予測ホライズンをより長く設定する必要がある。なお、飽差・気温制御に関しては、天気予報を利用することで、外乱入力の変化を予測出力に考慮することが可能である。

本モデル予測制御器では、制御時に窓開度の動きが激しいため、実際のハウスに設置した場合にモータの寿命が短くなったり、電気代コストが嵩んだりすることが懸念される。制御ホライズン  $M$  を3から7ステップとすることで、激しい制御入力の変動を多少緩和することができたが、それ以上のステップで設定しても10分間で3往復する窓開度5~25%の動きは抑制できなかった。激しい窓開度の変動は、日射量や飽差の高周波成分の変動と連動していると考えられる。実際的な窓開閉システムにおいては、窓開度の値がステップ関数的であること、一度動かした後、一定時間は元に戻さないことなどの制約がある。モデル予測制御においても、制御入力の値に現実的な制約をつけることで、激しい変動を抑えられると考えられる。

ハウス内飽差を低く抑えるには、ハウス外の高い飽差がハウス内に流れ込まないように、窓を閉めてハウス内飽差を維持する方法と、窓を開けてハウス内気温を下げることでハウス内飽差値を下げる方法の2つが考えられる。本モデル予測制御器では、窓開度の減少とハウス内飽差の減少の相関が強いモデルのため、飽差制御の重みが大い場合、窓を閉めてハウス内飽差を低く抑えている。しかし、日射量が大きい時間帯では、窓を閉めてハウス内飽差を低く維持しようとしても、ハウス内気温が高くなり結果的にハウス内飽差が上昇した。

## 5. まとめ

本研究では、冬期の栽培下ハウスの実測値を用いて、窓開度を入力とするモデル予測制御器により、ビニールハウス内飽差と気温の制御を試みた。モデル作成に関しては、部分空間法を用いて、ハウス内飽差とハウス内気温の2出力モデルを、ハウス外飽差とハウス外気温、ハウス内日射量、窓開度の4入力により作成した。モデル作成に用いる環境データが異なる2つのモデルでは、一方ではハウス内気温の変動パターンをよく再現しており、もう一方ではハウス内飽差の変動パターンをよく再現していた。今後、モデル作成に用いる環境データ期間を増やすことで、ハウス内気温とハウス内飽差の両方をよく再現できるモデルの作成が期待できる。

作成した2つのモデルに基づき、モデル予測制御器を作成して評価を行った。窓開度を自動で調整することで、ハウス内気温に関しては目標値を追従できており、ハウス内飽差に関しては、設定した上限値以下で目標値に近づく制御ができた。また、モデル作成に利用した環境データに対しても、モデル予測制御を適用することで、モデル化誤差がほぼ含まれない制御を行い、モデル化誤差が含まれる制御と比較した。結果的には、小さな変動の差は見られたが、長い時間スケールの変化に関しては、モデル化誤差の影響は非常に小さかった。しかし、得られた窓開閉の制御入力値は、実際のハウスで運用するには課題が残るため、モデル予測のシステムの改良とモデル作成に利用する環境データ量を増やしてさらに実験を行う。

## 謝 辞

ビニールハウス施設の利用に関しては、高知県立高知工業高等学校北村晋助校長と、お母様の北村康子氏に大変お世話になりました。深く御礼を申し上げます。本研究はJSPS 科研費20K06332の助成を受けたものです。

## 参考文献

- 1) 高倉直, 相対湿度でなくなぜ飽差による制御なのか, 農業および園芸, 89(1), 40-43, 2014
- 2) 斎藤章, ハウスの環境制御ガイドブック, 農山漁村文化協会, 2015
- 3) F. Rodríguez, M. Berenguel, J. L. Guzmán, and A. Ramírez-Arias, Modeling and control of greenhouse crop growth, Springer International Publishing, Switzerland, 9-97, 2015
- 4) M.Y. El Ghoumari, H.-J. Tantau, and J. Serrano, Non-linear constrained MPC: Real-time implementation of greenhouse air temperature control, Computers and Electronics in Agriculture, 49, 345-356, 2005
- 5) A. Pawlowski, J. L. Guzmán, F. Rodríguez, M. Berenguel, and J. E. Normey-Rico, Predictive control with disturbance forecasting for greenhouse diurnal temperature control, IFAC Proceedings Volumes, 44(1), 1779-1784, 2011
- 6) K. Ito, and T. Tabei, Model predictive temperature and humidity control of greenhouse with ventilation, Procedia Computer Science, 192, 212-221, 2021
- 7) 中山信, 高田拓, 木村竜士, 岡宏一, 2変数入力のシステム同定法によるビニールハウス内の気温・飽差モデル—春秋期におけるモデルの短期間構築と評価—, 農業情報研究, 30(1), 1-12, 2021
- 8) 中野明正, 安東赫, 栗原弘樹, ICT農業の環境制御システム製作, 誠文堂新光社, 東京, 2018
- 9) 渡利久規, 山崎敬則, 古瀧雅和, 黒須茂, 制御理論講話(その5)—モデル予測制御—, 小山工業高等専門学校研究紀要, 36, 67-76, 2004

受理日: 2021年11月6日