

窓開度を考慮した部分空間法によるビニールハウス内の飽差気温モデル：
冬期モデルの評価

中山 信^{*1}・宮岡奨一朗^{*2}・木村竜士^{*1}・大角理人^{*1}・高田 拓^{*3}

Improvement of the humidity deficit and air temperature greenhouse model via the subspace method depending on the window opening degree: Model evaluation during winter

Shin NAKAYAMA^{*1}, Shoichiro MIYAOKA^{*2}, Ryushi KIMURA^{*1},
Masato OHSUMI^{*1}, and Taku TAKADA^{*3}

Summary

In this study, we developed a humidity deficit and air temperature model to improve the model predictive controller based on the window opening degree in a greenhouse facility in winter where the boiler is in operation. The purpose is to improve the accuracy of the model output values during the daytime from 8:00 to 16:00 by utilizing environmental data inside and outside the greenhouse for approximately one month via the subspace method. By selecting the model creation period, we developed four models: (1) night-time daytime model, (2) daytime model, (3) daytime sunny model, and (4) daytime rainy cloudy model, and we evaluated each model. For all models, the average Fit rate was low at 43% or less for humidity deficit and 65% or less for air temperature; however, the average root mean square error (RMSE) was sufficiently low at 0.63 g/m³ or less for humidity deficit and 1.6 °C or less for air temperature. When the humidity deficit and air temperature fluctuations per day are small, such as in winter, evaluation with the RMSE rather than Fit rate is more appropriate. In comparison with existing models, the developed models perform effectively as a prediction model for window opening/closing control in winter.

Key words: greenhouse, subspace method, humidity deficit, temperature, window opening degree

1. はじめに

近年の施設園芸栽培では、乾燥度の指標である飽差を3～6 g/m³にすることが、植物の光合成の促進につながると認知されている¹⁾。しかし、ハウス外飽差が高くなる冬期において、日射による気温上昇を防ぐために窓を開けると、乾燥した空気がハウス内に流入し飽差値が基準値を超えやすくなる。ハウス外の飽差や気温、日射を考慮しながら窓開閉によってハウス内の飽差と気温を同時に制御するため、多入力多出力のモデルベース制御が有効である²⁾。

筆者らは、ボイラーが稼働しない春秋期において、1カ月間ほどの環境データからシステム同定法（ARX・OEモデル）により、適合度（Fit率）が高いハウス内飽差・気温モデルを作成した³⁾。一

*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 専攻科2年

*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

方、冬期においては、ボイラーが稼働しない日中のデータからシステム同定法（部分空間法）によりハウス内飽差気温モデルを作成して、窓開度によるモデル予測制御を適用して効果を示した⁴⁾。しかし、1日間の環境データでのモデル作成であったため、精度の良いモデルに至っておらず、様々な気象条件下で精度の高い冬期ハウスの飽差気温モデルが望まれる。

本研究では、ボイラーが稼働する冬期において、窓開度によるモデル予測制御器を向上させるため、1カ月間程度の環境データを用いて、部分空間法によるモデル作成を実施した。また、窓の開閉が発生する日中の精度を重視し、モデル作成に用いるデータ期間を①夜間と日中、②日中、③日中晴れ、④日中雨曇り、のように区別して、異なる4つのモデルを作成して、比較評価した。

2. 実験環境

2.1 冬期ビニールハウス計測環境の概要

本研究では、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において、2018年12月から翌1月に計測を行った。図1(a)に示すように、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。ハウス内の気温が15℃を下回ると、図1(b)に示すボイラーが稼働する。ハウスの自動窓開閉装置は、モータによるビニールの巻上げによって天窓が開閉され、気温制御を行う。ピーマンの生育適温は昼温27~28℃であるため、制御周期90秒で、目標値28℃に対する差に比例した窓開け量となっている。センサ類は、図1(c)の温湿度センサ(GS-TH)をハウス内外の通風筒内に設置し、図1(d)のハウス内照度センサ(GS-LXUV)を日当たりの良い場所に取り付けている。図1(e)の窓開度センサとしては、巻上げ式天窓にポテンショメータを設置して窓開度を電圧センサ(GS-4VT)により計測する。データロガーとしては、GRAPHTECのGL100によりサンプリングタイム1分で記録する。



図1 ビニールハウスと各種センサ類の外観

2.2 環境計測データと天気情報

2018年12月6日6：00から2019年1月12日24：00にビニールハウスで計測した環境データと、高知県の1日毎の天気情報⁵⁾を図2に示す。ハウス外気温は日によって最低気温が10℃を超え、最高気温が20℃程度まで達する日があるが、寒い時期には、最低気温が0℃程度で、最高気温も10℃程度まで下がる日があり、典型的な晩秋から冬期の気温変化が見られている。ハウス内では、夜間（主に16：00～8：00）はボイラーによって15℃を下回らないように、日中（主に8：00～16：00）は自動窓開閉器により28℃を上回らないように制御している。ボイラー稼働時には、ボイラーの

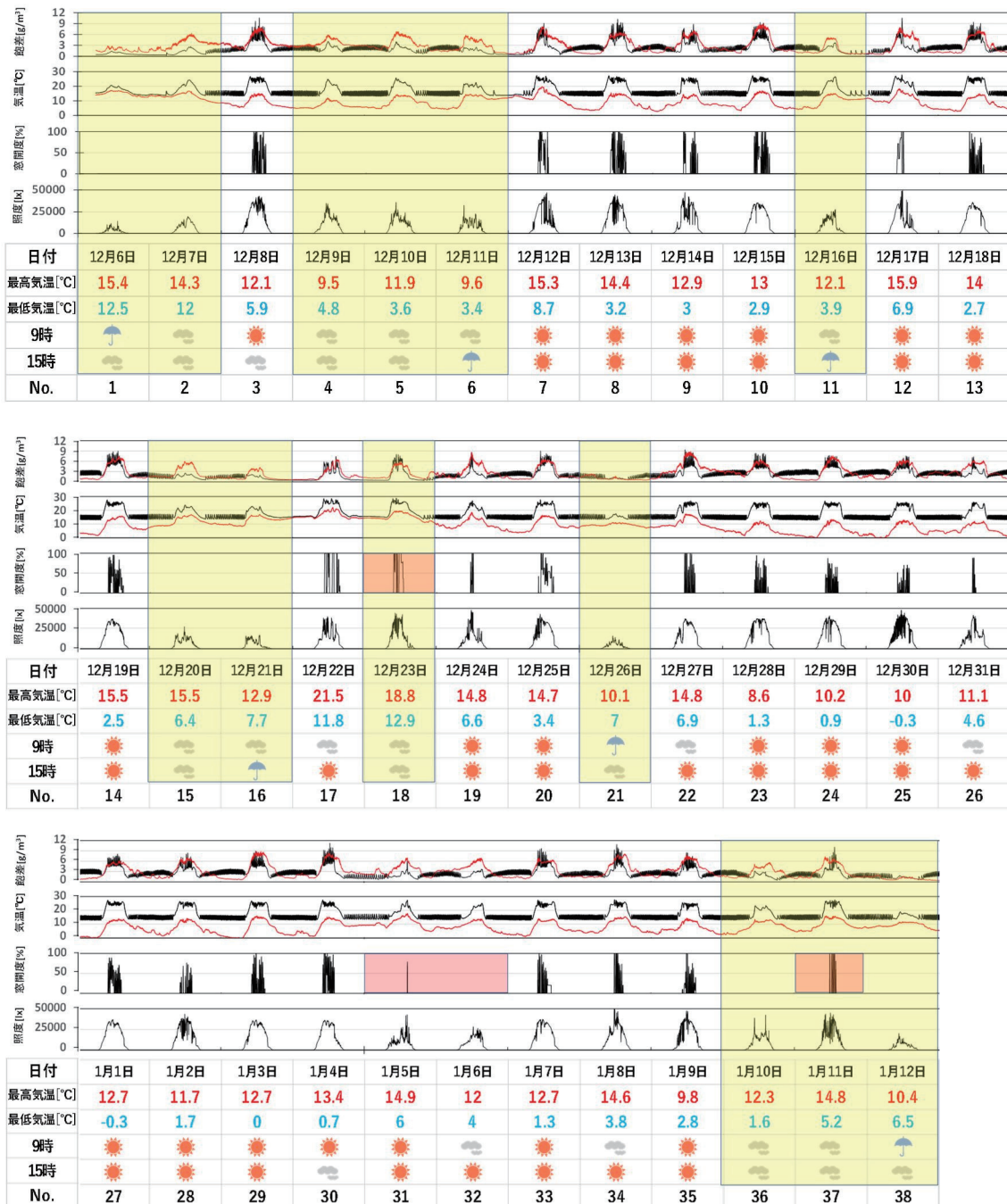


図2 2018年12月6日～2019年1月12日のハウス内外の計測データ、最高最低気温と高知県の天気⁵⁾（グラフの黒線はハウス内、赤線はハウス外データ）

断続的なオンオフのために、ハウス内気温は温度幅を持った一定の変化を示しており、冬期の夜間は、ほぼ毎晩ボイラーが稼働している状態である。ハウス内飽差はハウス外飽差よりやや小さいが、日中 6 g/m^3 を超える日があり、ピーマンの生育不良が懸念される。黄色でマスキングした雨曇りの日には、基本的には窓開度の変化がなく、窓が閉じた状態である。ただし、窓開度を赤色でマスキングした日は、曇りにもかかわらず、照度が高く、日中に窓の自動開閉が行われた日である。黄色のマスキングのない晴れの日には、日中に窓開度の変化があり、ハウス内気温が高くなったために、窓の開閉が行われた日である。ただし、窓開度を赤色でマスキングした日は、晴れにもかかわらず、照度が低く、窓開閉がほとんどなかった日である。冬期の天気の状態と窓開度には、一定の関係があるが、例外も含まれることが確認できた。

3. ハウス内飽差気温モデル

3.1 モデルの概要

離散時間系の線形状態空間モデルを (1) 式として設定する³⁾。

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

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ため、サンプリングタイム 1 分の (2) 式のデータを入出力データとする。

$$\begin{cases} \mathbf{u} = [\text{ハウス外飽差} \quad \text{ハウス外気温} \quad \text{ハウス内照度} \quad \text{窓開度}]^T \\ \mathbf{y} = [\text{ハウス内飽差} \quad \text{ハウス内気温}]^T \end{cases} \quad (2)$$

入出力データは、飽差・照度・窓開度の基準値が 0、気温の基準値が $15 \text{ }^\circ\text{C}$ の変位データとする。ハウス内気温はボイラー設定温度の $15 \text{ }^\circ\text{C}$ が実質的に最低温度となるためである。状態変数 \mathbf{x} の次数は 6 次として、(2) 式の入出力データから、部分空間法 (N4SID法)⁶⁾ により \mathbf{A} 、 \mathbf{B} 、 \mathbf{C} の行列を求めることで、6 次の数値モデルを作成する。モデル評価においては、(3) 式の Fit 率と (4) 式の RMSE (Root Mean Squared Error) を使用した。

$$\text{Fit 率 [\%]} = \left(1 - \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^N \{y(k) - \hat{y}(k)\}^2}}{\sqrt{\sum_{k=1}^N \{y(k) - \bar{y}\}^2}} \right) \cdot 100 \quad (3)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \{y(k) - \hat{y}(k)\}^2} \quad (4)$$

ここで \bar{y} は実測値 y の平均値、 \hat{y} はモデル出力値、 k はサンプル時間毎のステップ数、 N はデータ数である。(3) 式の右辺第 2 項は、RMSE 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

作成するモデルは、窓開度を用いたモデル予測制御器に使用するため、ハウス内飽差と気温が日中の窓開閉に対する動特性をもつことが求められる。そのため、ボイラーが稼働する夜間 (おおよそ $16:00 \sim 8:00$) のデータをモデルに含む必要はない。また、雨曇りの日はハウス内気温が上が

らず、窓を開ける必要がないことが多いため、晴れの日と雨曇りの日を区別してモデルを作成することが考えられる。その場合、将来的には、天気予報を利用して、モデルを使い分けることが可能となる。以上を踏まえて、4種類の期間を抜き出したデータセットを用いてモデルを作成し、①夜間日中モデル、②日中モデル、③日中晴れモデル、④日中雨曇りモデル、とした。モデル作成期間は図2のNo. 1～30までの30日間で、夜間は16:00から翌8:00、日中は8:00から16:00とし、過去の天気実績を用いた。

図3に、モデル作成に使用したデータ期間に対して、実測値とモデル出力値を示す。全体的にモデル出力値は実測値とよく合っているが、①の夜間における飽差および気温や、①②③の晴れの日中における気温で差が見られた。ただし、夜間の実測値はボイラー稼働のため変動幅が大きいが、モデル出力値は実測値の平均値程度を捉えており、最適化されているように見える。気温の差に関しては、No.17, 18の日中の気温が最も大きく、実測値に対してモデル出力値は4℃程度低い。モデル作成期間全体に対するFit率は、飽差で63.7～74.0%、気温で53.1～76.5%であり、モデル出力値は実測値の傾向を大まかには掴んでいる。モデル毎のFit率に関しては、飽差で④>②>③>①、気温で④>①>②>③となっている。飽差・気温ともに④日中雨曇りモデルのFit率が高いが、飽差では①夜間日中モデルのFit率が低く、気温に関しては、③の日中晴れモデルのFit率が低い。モデル作成期間全体に対するRMSEは、飽差で0.29～0.59 g/m³、気温で0.78～1.53℃である。モデル毎のRMSEに関しては、飽差で④<②<①<③、気温で④<①<②<③となっており、飽差・気温ともに

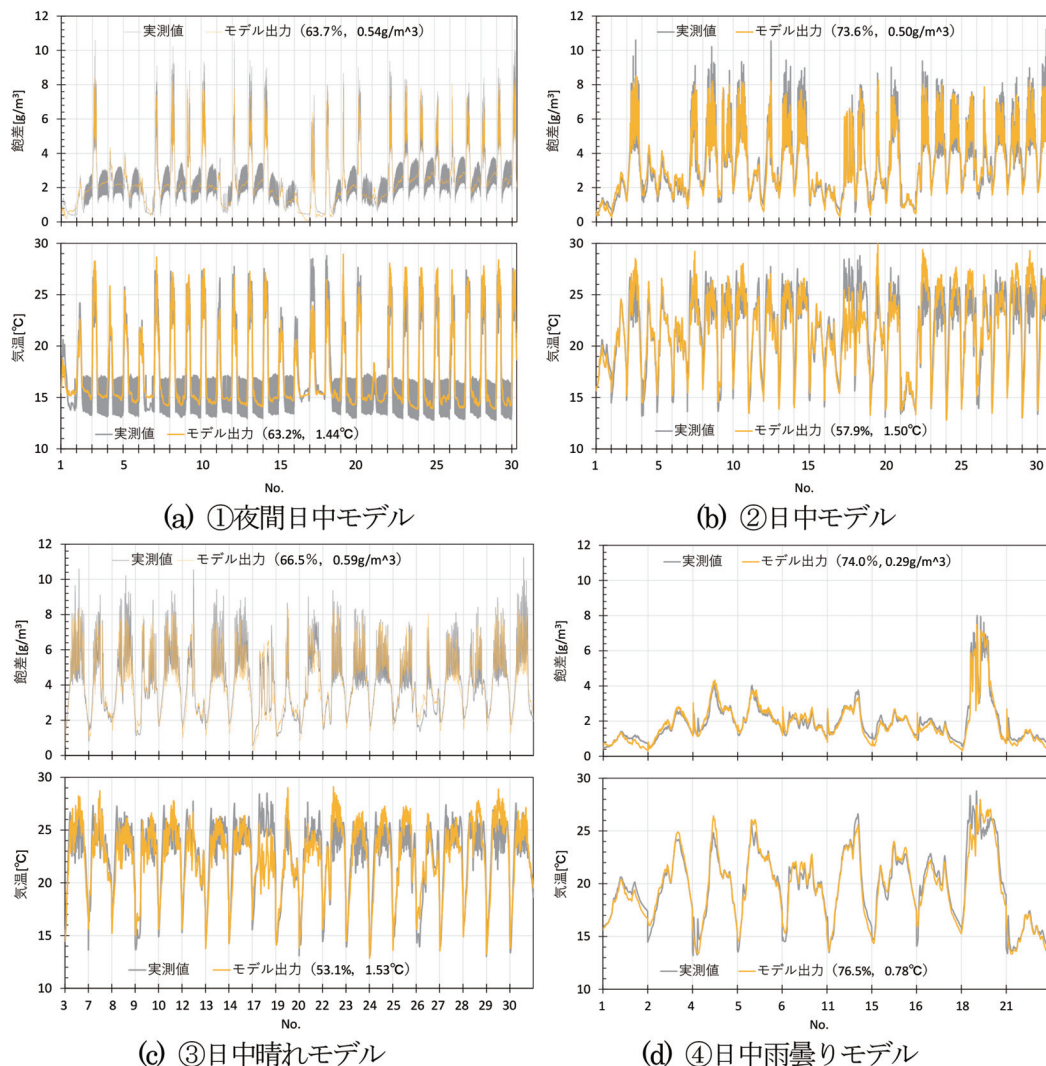


図3 4種類のデータセット毎の飽差・気温のモデル評価 (Fit率およびRMSE)

④の雨曇りモデルのRMSEが小さく、③の日中晴れモデルのRMSEが大きい。④の雨曇りモデルと③の日中晴れモデルの差は、日中のハウス内照度と窓開度が小さい④と大きい③の差であり、照度と窓開度が小さい場合はモデルが適合しやすく、大きい場合はモデルが適合しにくいことを示している。

次に、対象としている日中8:00~16:00の時間帯に対して、1日毎のモデルFit率とRMSEを確認した。図4で、Fit率は50%を下回る日が複数あり、全体的に①夜間日中モデルで低く、②日中モデルと③④の天気別モデルでは、日によって優劣があるが、平均的には③④の天気別モデルが若干上回っている。ただし、特に飽差のFit率が低い日(No. 1, 6, 16, 21)は、飽差の日変化が小さい(図2参照)。Fit率は、(4)式に示すように、実測値の平均からの変位で規格化しているため、日変化が小さい場合、同じ飽差の差であっても、Fit率が悪くなる。窓開度制御する際に重要なのは、飽差や気温の基準となる値からの差であり、RMSEに相当する。そこで、モデル出力値のRMSEを確認すると、全体的には飽差で 1 g/m^3 以下、気温で概ね $2 \text{ }^\circ\text{C}$ 以内で一部 $4 \text{ }^\circ\text{C}$ 程度となっている。圃場で求められる測定精度としては飽差 0.5 g/m^3 程度や気温 $0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 程度以下であるが、モデル予測制御では、現在の実測値とモデル出力値との差を考慮しつつ、予測値を時々刻々と修正しつつ制御を行うため、日中を通して飽差 1 g/m^3 程度や気温 $1 \sim 2 \text{ }^\circ\text{C}$ 程度の誤差のモデルは十分利用できる。飽差でのモデル毎の差に関しては、④雨曇りモデルでRMSEが低く、①夜間日中モデルでRMSEが高い。②日中モデルと③日中晴れモデルでは、日によって優劣が変化する。気温に関しては、No.17とNo.18を除き、RMSEは $2 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下で、予測制御に十分利用できる。モデル毎の差に関しては、④雨曇りモデルでRMSEが低く、①夜間日中モデルでRMSEが高い。②日中モデルの方が、③日中晴れモデルに比べるとややRMSEが低く、気温に対しては、天気別モデルの方が良い。No.17とNo.18は、ハウス外気温が $18 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上と最も高く、ハウス内外での気温差が $10 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下程度と小さかったため、窓開度によるハウス内気温を下げる効果が小さくなり、平均化されたモデル出力値と実測値が適合しなかったと考えられる。

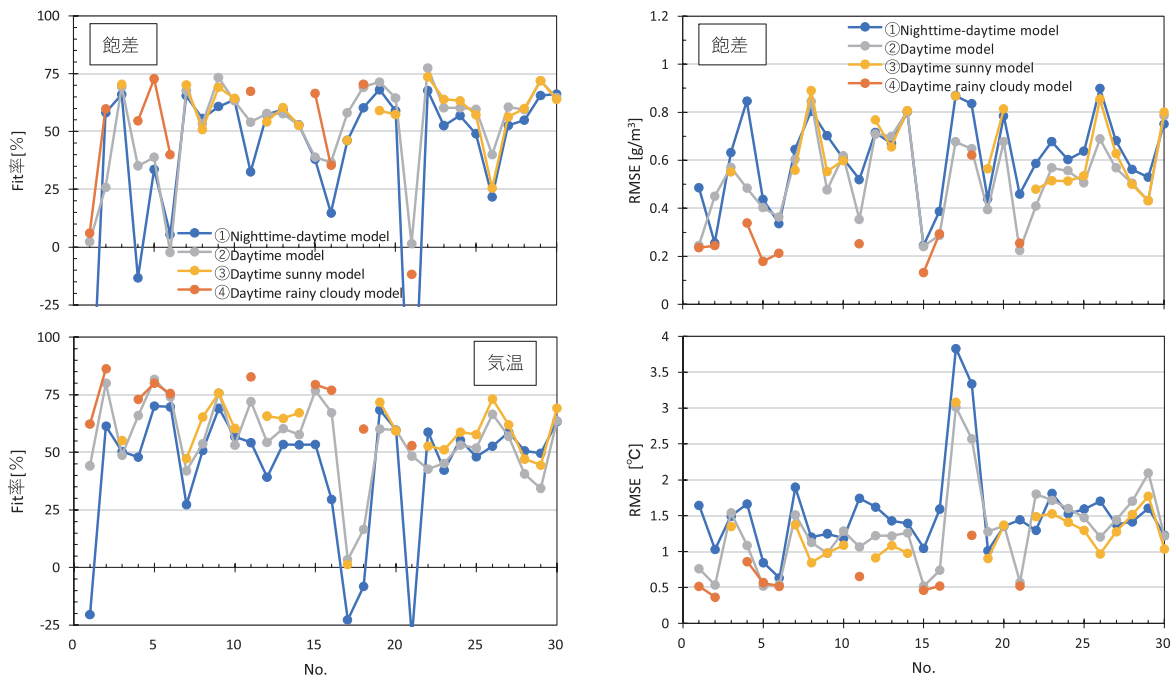


図4 モデル作成期間の各日8:00~16:00におけるモデル出力値のFit率(左)とRMSE(右)(青線:①夜間日中モデル, 灰線:②日中モデル, 黄線:③日中晴れモデル, 橙線:④日中雨曇りモデル)

3.3 モデルの評価

モデル評価期間を、モデル作成に利用しなかった8日間(図2のNo.31~38まで)として、日中8:00~16:00の時間帯に対して、1日毎のモデルFit率とRMSEを図5に示す。図4と同様に、Fit率は50%を下回る日が複数あるが、RMSEの値は飽差で 1 g/m^3 以下、気温で概ね $2 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下であり、予測制御に用いるモデルとしては十分な精度である。冬期の飽差や気温は1日当たりの変化幅が小さく、モデル評価には、Fit率よりRMSEを用いる方が妥当であることが再確認できた。飽差のRMSEでは、④日中雨曇りモデルは③日中晴れモデルより優位であり、②日中モデルはその間の値となっている。気温のRMSEでは、③日中晴れモデルは④日中雨曇りモデルより優位であり、②日中モデルは③日中晴れモデルに近いがやや値が大きい。

次に、RMSEの値が特に大きかった日のモデル評価を確認する。飽差のRMSEが 1 g/m^3 程度と最も高かったNo.32と、気温のRMSEが $2 \text{ }^\circ\text{C}$ 程度と最も高かったNo.35のモデル評価を図6に示す。実測値に見られる20分周期程度の飽差と気温の大きな上下変動は、8:00~9:00がボイラーの影響であり、No.35の10:30~15:10の変動は自動窓開閉器の影響である。ボイラーは、モデル作成期間では8:00までに稼働を停止していることが多かったが、季節進行によりモデル評価期間では9:00まで稼働することがあった。No.32の飽差は最大でも 4 g/m^3 以内であり、飽差のRMSEは 1 g/m^3 以下である。RMSEが大きくなる原因としては、朝方のボイラー効果による初期値の影響で午前中の予測値が実測値とずれているためである。No.35の気温では、朝方のボイラーと正午から午後にかけての自動窓開閉器の効果により、実測値が変動している。図2で示したように、この日は最高気温が $10 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下と低かったため、モデルの推定値よりもハウス内気温が上がらず、RMSEが $2 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上に大きくなったと考えられる。

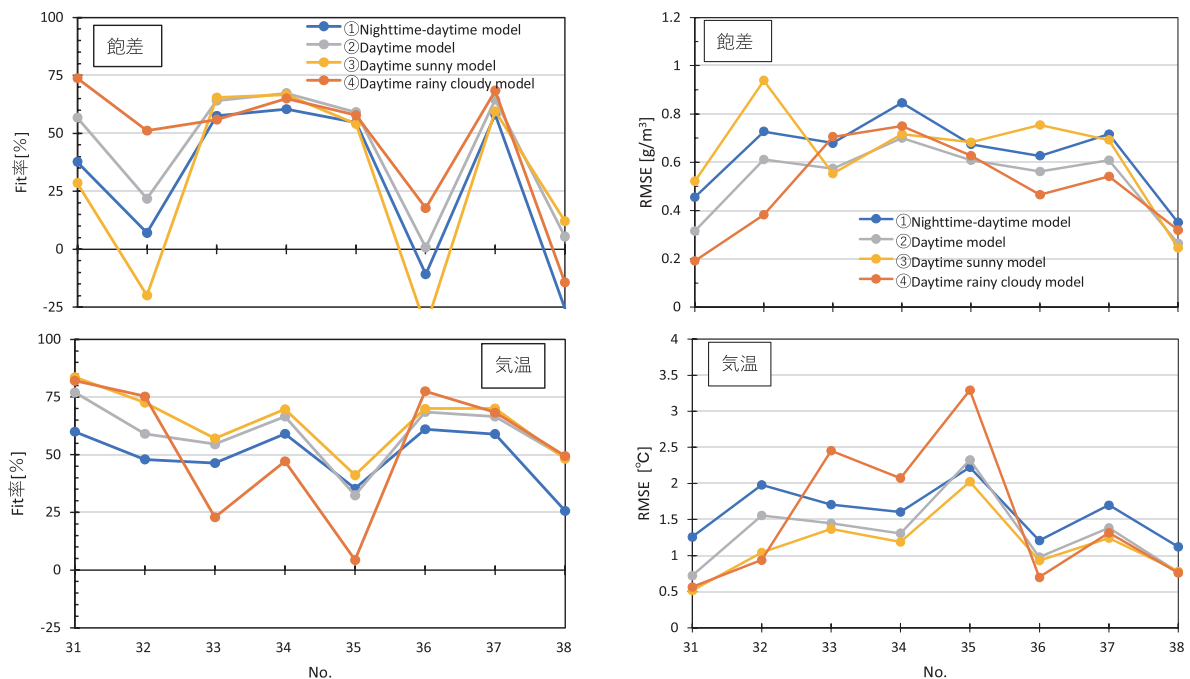


図5 モデル評価期間の各日8:00~16:00におけるモデル出力のFit率(左)とRMSE(右)(青線:①夜間日中モデル, 灰線:②日中モデル, 黄線:③日中晴れモデル, 橙線:④日中雨曇りモデル)

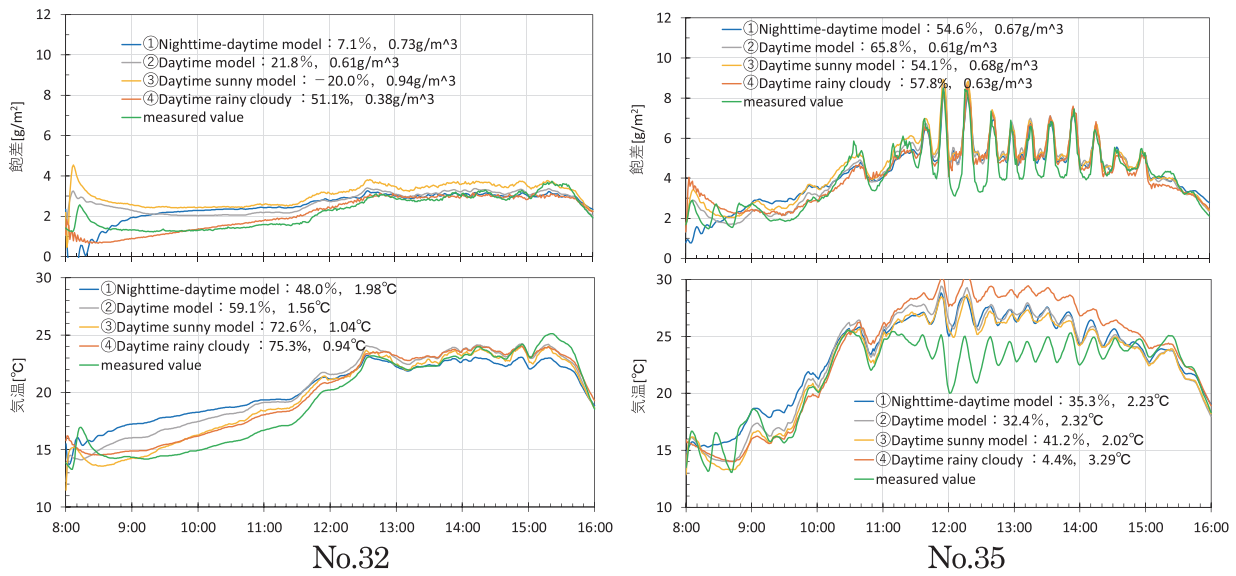


図6 モデル評価におけるRMSEが最大の日の例：飽差 (No.32) と気温 (No.35)

最後に、評価期間におけるモデル評価の平均値と標準偏差を表1に示す。③④天気別は、晴れの日には③日中晴れモデルを、雨曇りの日には④日中雨曇りモデルを適用して統合した結果である。全モデルに対するFit率の平均は、飽差は43%以下とかなり低く、気温も65%以下と決して高くない。一方でRMSEの平均値は、飽差が 0.63 g/m^3 以下、気温が $1.6 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下と、十分な精度である。RMSEで評価すると、飽差では②日中モデルが良く、気温では③④天気別モデルが良かった。天気別モデルが高い評価とならなかったのは、③晴れの日モデルのRMSEが大きかったためである。ただし、④雨曇りモデルは、飽差と気温ともにRMSEが小さく、モデル作成時の学習データが適切であれば、天気毎のモデル評価の方が良くなる可能性があると考えている。

表1 評価期間におけるモデル評価の平均値と標準偏差 (①夜間日中モデル, ②日中モデル, ③日中晴れモデル, ④日中雨曇りモデル)

| モデル評価 | 飽差 | | 気温 | |
|--------|-----------|-------------------------|-----------|----------|
| | Fit率[%] | RMSE[g/m ³] | Fit率[%] | RMSE[°C] |
| | 平均±標準偏差 | 平均±標準偏差 | 平均±標準偏差 | 平均±標準偏差 |
| ① | 29.9±32.4 | 0.63±0.15 | 49.3±12.3 | 1.6±0.36 |
| ② | 42.5±26.4 | 0.53±0.15 | 59.2±13.0 | 1.3±0.48 |
| ③④天気別* | 33.3±33.9 | 0.59±0.17 | 64.9±13.5 | 1.1±0.45 |
| ③晴れ日 | 39.0±32.5 | 0.68±0.15 | 64.8±14.5 | 1.2±0.49 |
| ④雨曇り日 | 24.0±34.0 | 0.44±0.09 | 65.1±11.6 | 0.9±0.28 |

*③④天気別：晴れの日No.31～35に③日中晴れモデルを、雨曇りの日No.36～38に④日中雨曇りモデルを適用して統合した評価

3.4 モデル予測制御器への適用に関する考察

作成されたモデルは、窓開度によるモデル予測制御器として利用されることを想定している。先行研究³⁾では、マイナスのFit率となるような日でも、窓開度に対する動特性をもつモデルであれば、15分間先の出力予測により、目標飽差 4.5 g/m^3 、目標最大飽差 6 g/m^3 、目標気温 $27 \text{ }^\circ\text{C}$ を達成するようなモデル予測制御が窓開度により実現可能であることが示されている。今回作成したモデルをモデル予測制御器に適用した場合、飽差のFit率が低かったNo.32でも、RMSEは飽差 1 g/m^3 以下の許容範囲であるため、先行研究と同様にモデル予測制御が適切に働くことが期待される。また、気温のRMSEが大きかったNo.35では、定常的な差はあるものの、窓開度により飽差と気温が上下するタイミングは同期しているため、ハウス内飽差と気温が日中の窓開閉に対する動特性をもつモデルになっている。いずれのモデルを使用しても、目標最大飽差以下で、目標気温を維持するモデル予測制御は可能であると考えている。制御の精度を最も良くするためには、基本的には天気予報に応じて③日中晴れモデルと④日中雨曇りを使い分けるのが良い。ただし、晴れの日窓が開かない日があった場合、③の性能は②日中モデルよりも悪くなる。しかし、自動窓開閉器の窓が開かない日は、ハウス内の気温が目標気温より低い場合、ハウス内飽差が低く抑えられており、モデル予測制御による窓開閉器でも窓が開かない日となる。よって、窓開度によるモデル予測制御のためには、天気別モデルで十分であると考えられる。

4. まとめ

本研究では、ボイラーが稼働する冬期のビニールハウス施設において、窓開度によるモデル予測制御器の向上を目指すため、日中8:00~16:00の飽差・気温モデルの作成に取り組んだ。ハウス内外の30日間の環境データを活用して、部分空間法により「①夜間日中モデル」「②日中モデル」「③日中晴れモデル」「④日中雨曇りモデル」の4モデルを作成し、評価期間8日間で各モデルを比較評価した。

結果として、評価期間での全モデル出力に対するFit率の平均は、飽差が43%以下、気温が65%以下と低かったが、RMSEの平均値は、飽差が 0.63 g/m^3 以下、気温が $1.6 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下になるなど十分な精度であった。冬期のように飽差や気温の1日あたりの振れ幅が小さい場合には、Fit率よりもRMSEで評価することが適切であることが示唆された。先行研究を考慮すると、本手法によるモデル作成は、冬期の窓開閉制御の予測モデルとして十分な性能である。

4モデルの違いに関して、各モデル出力に対するRMSEの平均値は、飽差では① $0.63 \pm 0.15 \text{ g/m}^3$ 、② $0.53 \pm 0.15 \text{ g/m}^3$ 、天気別モデルの③④ $0.59 \pm 0.17 \text{ g/m}^3$ となり、②の日中モデルが最も精度が良かった。気温では、① $1.6 \pm 0.36 \text{ }^\circ\text{C}$ 、② $1.3 \pm 0.48 \text{ }^\circ\text{C}$ 、天気別モデルの③④ $1.1 \pm 0.45 \text{ }^\circ\text{C}$ となり、③④天気別モデルが最も精度が良かった。本作成モデルで最大精度を出すためには、飽差は「②日中モデル」、気温は「③日中晴れモデル」と「④日中雨曇りモデル」を天気を使い分けると良い。今回は天気実績を利用して評価したが、将来的には天気予報を利用したモデル選択が有効であると考えている。

謝 辞

ビニールハウス施設の利用に関しては、高知工科大学 岡宏一教授、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) K. Ito, and T. Tabei, Model predictive temperature and humidity control of greenhouse with ventilation, *Procedia Computer Science*, 192, 212-221, 2021
- 3) 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
- 4) 中山信, 中脇匠悟, 木村竜士, 大角理人, 高田拓, 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, 高知工業高等専門学校学術紀要, 67, 25-34, 2022
- 5) 過去の天気 - goo天気, <https://weather.goo.ne.jp/past/>, 2022年10月25日参照
- 6) 足立修一, *Matlab* による制御のための上級システム同定, 東京電機大学出版局, 2004

受理日: 2022年11月9日