



Title	サイバーフィジカル植物工場システムの開発
Author(s)	栗本, 育三郎
Citation	サイバーメディアHPCジャーナル. 2026, 16, p. 13-16
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/106224
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

サイバーフィジカル植物工場システムの開発

栗本育三郎

木更津工業高等専門学校 情報工学科

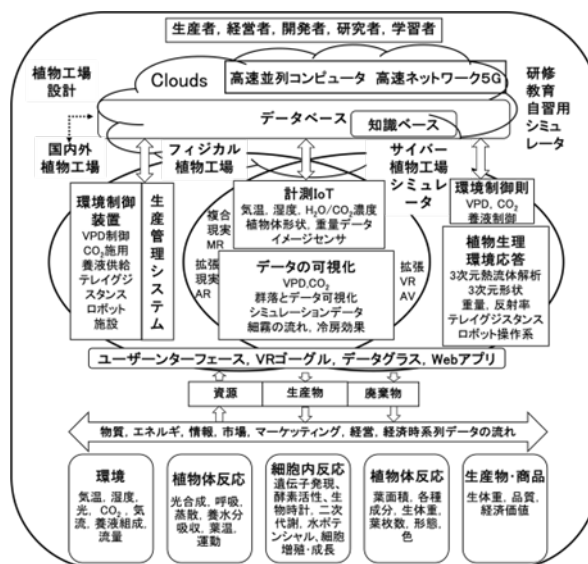
(令和8年4月現在：環太平洋大学 東京キャンパス 国際経済経営学科 DX イノベーションコース)

1. はじめに

近年、少子高齢化や地球温暖化に伴う食料生産の不安定化を背景として、環境制御により安定的に作物生産を行う植物工場への関心が高まっている。特に太陽光型植物工場は、エネルギーコストの低減と環境負荷の軽減の観点から重要な生産方式として注目されている。植物工場においては、温度・湿度・CO₂濃度といった環境要因が作物の生育に大きな影響を与える。なかでも水蒸気飽差（Vapor Pressure Deficit; VPD）は光合成や蒸散に密接に関係する指標であり、その適切な制御が収量および品質の向上に寄与することが知られている。本研究グループではこれまでに、細霧発生システムを用いた VPD 制御によりトマト収量を 10～20%向上させることに成功している[1]。

しかし、VPD 制御においては振動や定常偏差の問題が残されており、大規模な環境データの有効活用や、最適な制御則の設計は未だ十分とはいえない。また、実植物工場での試行はコストや時間の制約が大きく、新たな制御手法の検証には限界がある。

そこで本研究では、大阪大学 D3 センターの大規模 HPC を活用し、植物工場のデジタルツインを基盤としたサイバーフィジカル植物工場システムの構築を目指す。サイバーフィジカル技術を駆使して環境計測制御を最適化し、VPD をパラメータとした植物生理、環境応答、光合成最大化の機序をモデル化すること、また、生産者、研究者、開発者、経営者、学習者に対して環境や生育情報、予測情報を複合現実として提供し、植物工場の高度化を実現することである。図 1 に提案するサイバーフィジカル植物工場システムの概念図を示す。



2. 研究目的と概要

本研究の目的は、以下の 2 点に集約される。

- ・熱流体解析と計測データを統合したデジタルツインの構築
 - ・VPD 制御の高精度化および新たな制御手法の検証
- サイバー空間に構築した植物工場モデルと実環境の計測データを統合することで、環境応答や植物生理の理解を深めるとともに、制御手法の設計・評価を効率的に行うことが可能となる。さらに、得られた知見を生産・経営・教育へと展開することにより、データ駆動型農業の高度化を目指す。

3. 対象システムと課題設定

対象とした施設は、千葉大学環境健康フィールド科学センターに設置された太陽光型植物工場（5 号棟）である。施設の一部の写真を図 2 に、施設全体および解析領域の平面図を図 3 にそれぞれ示す。図 3 中、

左側の領域は対照区（環境制御等を行わない領域）、右側の領域（緑色線の領域）は実験区（環境制御を実施）である。図中の青丸は風速や湿度を計測するセンサ位置を示す。本施設では細霧発生システムを用いて温度および湿度を制御し、VPD を目標値に維持する制御が行われている。しかし実システムでは以下の制約が存在する。

- ・ 制御入力に細霧噴霧による加湿のみ
- ・ 非線形かつ時空間分布を持つ環境変動

これらの制約により、従来制御では振動や制御誤差が発生していた[1][4]。したがって、本研究では離散値入力および制御むだ時間を考慮した制御手法と大規模細霧発生シミュレーションによる状態推定を統合的に取り扱うことを課題とした。



図2 対象施設外観（千葉大学環境健康フィールド科学センター太陽光型植物工場 5号棟）

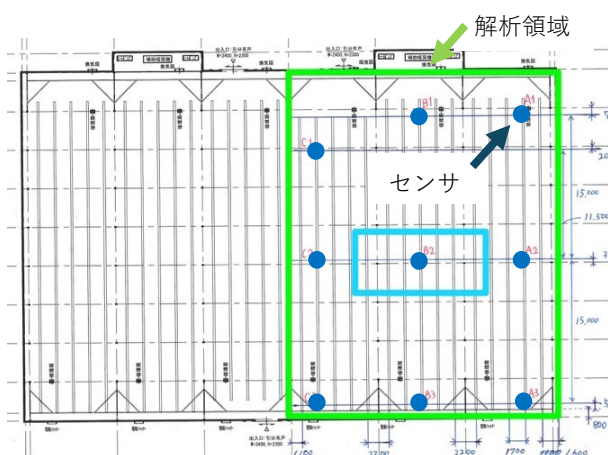


図3 施設全体の平面図

4. 計算手法と HPC 利用

4.1 数値シミュレーション環境

本研究では、大阪大学 D3 センターの大規模 HPC SQUID を利用した。シミュレーションには汎用熱流体解析ソフト STREAM と独自開発の VPD 制御ソフトウェアを組み合わせた。解析の詳細については既報[2]を参照されたい。対象モデルは約 400 万メッシュの三次元空間であり、温度・湿度・気流を同時に解析する。基準計算では、60,000 タイムステップ（約 300 秒）の解析に対して 8 ノードで約 6 時間を要する。図 4 には熱流体解析による細霧と VPD の代表的な分布（瞬時値）を示す。図中の緑色丸印はセンサ位置を示すものであり、図 3 中の青丸に対応する。

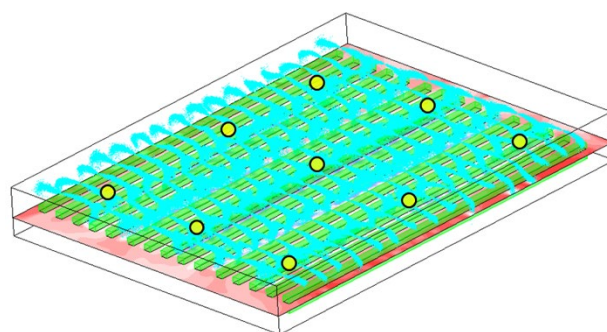


図4 熱流体解析によって得られた細霧・VPD の代表的な分布

4.2 データ同化

デジタルツインの高精度化のために、アンサンブルカルマンフィルタ（EnKF）によるデータ同化を導入した[3]。データ同化処理では、初期条件を変化させた複数のシミュレーション（アンサンブル）同時並行で実行し、アンサンブルのばらつきと観測データに基づいて逐次補正を行っていく。本解析では計算負荷軽減のため、施設内の小領域（図 3 中、水色枠で囲まれた領域）での実施とした。この領域中に観測点を 16 点配置し、アンサンブル数：76 としてデータ同化させた。本解析においては、事前に真値に対応づける解析を実施し、実際の解析との誤差を評価している。観測点における空気温度の時間履歴を図 5 に、真値との誤差を図 6 にそれぞれ示す。図中、実線は地上高 1.25 m における温度履歴であり、破線は

3.75 m のものである。図 7 にはデータ同化処理を加えた際の、観測点における空気温度の真値との誤差の時間履歴である。データ同化を行うことで実環境に近い状態推定を実現することに成功した。

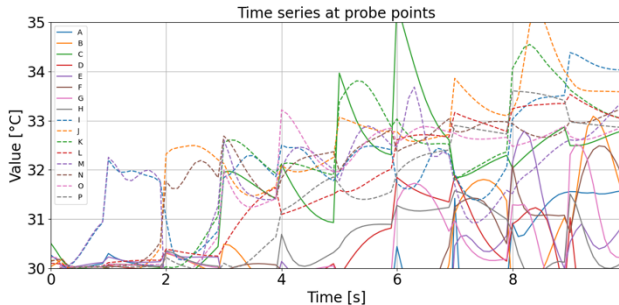


図 5 観測点における空気温度の時間履歴
(データ同化処理前)

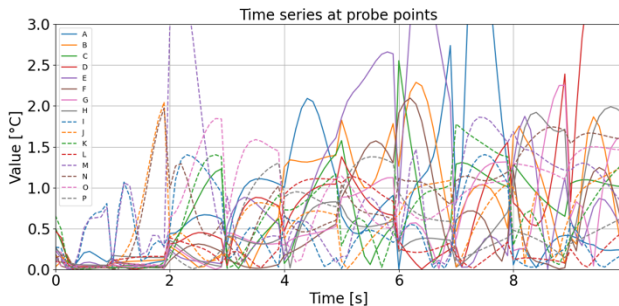


図 6 真値との誤差の時間履歴
(データ同化処理前)

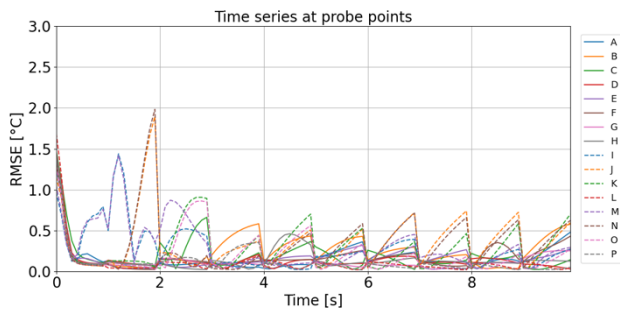


図 7 データ同化処理を施した際の、
真値との誤差の時間履歴

5. 制御手法の検討

ここまでで述べた HPC 環境上のデジタルツインを用いて、以下の制御手法を評価した。

5.1 モデル予測制御

むだ時間および入力制約を考慮したモデル予測制

御系を設計し、さらに静的量子化器により離散値入力を実現した。代表計測点における VPD 値の時間履歴を従来手法 (比較手法) と提案手法で比較したものを図 8 に示す。ここでは目標 VPD 値を 1.0 kPa と設定しており、従来手法では定常偏差が発生していたが、提案手法では目標値への追従性が向上していることが確認できる。その結果として、VPD 値の平均値: 1.2726 → 1.0912、平均二乗誤差: 約 11.02% 低減が確認され、制御性能の改善が得られた[4]。

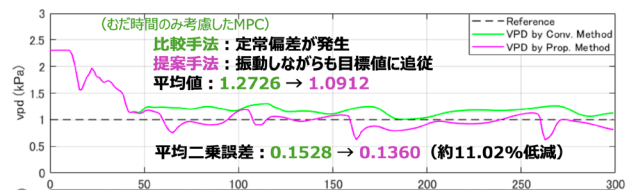


図 8 代表計測点における VPD 値の時間履歴

5.2 動的量子化制御

さらに、離散値区間による量子化誤差を低減するため、2 組のパラメータを切り替える動的量子化器を提案した。代表計測点における VPD 値の時間履歴を従来手法と提案手法で比較したものを図 9 に示す。その結果、過渡応答における振動低減および定常偏差の抑制を達成し、従来手法に対して優位性を示した[5]。

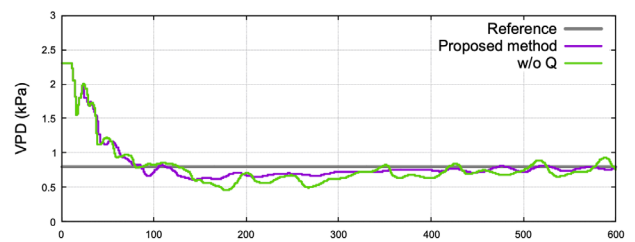


図 9 動的量子化制御を付加した際の代表計測点における VPD 値の時間履歴

6. 成果

本研究により、以下の成果が得られた。

(1) 大規模デジタルツインの構築

大規模 HPC 環境により、高解像度かつ長時間の植物工場シミュレーションを実現し、現実系の挙動を

再現可能なモデルを構築した。

(2) データ同化による精度向上

EnKFにより観測データとの整合性を向上させ、実環境に近い状態推定を達成した。

(3) 制御性能の改善

離散値入力・むだ時間を考慮した制御により、VPDの制御精度を向上させた。特に、振動の抑制・定常偏差の低減・応答性の改善が確認された。

(4) HPC 活用の有効性

膨大な計算資源を要する熱流体解析とデータ同化を統合することで、従来の実験ベース研究では困難であった検討を実現した。

7. まとめ

本研究では、大阪大学 D3 センターの大規模 HPC を活用し、大規模シミュレーションとデータ同化の統合により、従来困難であった高精度な環境再現と制御手法の検証が可能となった。

本成果によって、高精度なサイバーフィジカル植物工場システムの実現可能性を示すことができた。一方、実施規模でのデータ同化やリアルタイム制御の課題も明らかとなった。今後は、実環境との双方向連携を実現し、より高度なサイバーフィジカル植物工場システムの構築を目指す。

謝辞

本研究の一部は、大阪大学 D3 センター2025 年度公募型利用制度（大規模 HPC 支援）により実施された。また、JSPS 科研費基盤研究(B)23K23734 の支援を受けている。ここに謝意を表する。

参考文献

[1] K. Watanabe, Y. Asano, I. Kurimoto, T. Nukaya, A. Kano, and T. Maruo, “Development of Temperature and Vapor Pressure Deficit Control System Using Variable Rate Fogging in Plant Factory with Solar Light”, Transac. of the Society of Instrument and Control Engineers, Vol. 52, No. 5, pp. 292–298, 2016.

[2] Y. Itoh, et al.: “Development of control method on numerical simulation of temperature and humidity environment in a sunlight type plant factory,” the SICE Annual Conf., pp. 1262–1266, 2023.

[3] 中村ら, 日本機械学会関東支部 第 32 期総会・講演会, GS0211, 2026.3

[4] 西山ら, 第 13 計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, 1PS-38, 2026.3

[5] 福田ら, 第 13 計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, 1PS-57, 2026.3.