

ゼロ・エネルギーグリーンハウスに関する研究

研究代表者 菅野 颯馬
(理工学術院総合研究所 次席研究員)

1. 研究課題

日本の施設園芸の面積は 43,220 ha (2018 年) と世界第 4 位の規模であり、特に燃焼式暖房により年間 618 万トンの CO₂ を排出している。農業分野の脱炭素化に向けては、施設園芸の省エネルギー化と燃料転換が求められる。建築環境分野で適用されている建築物の省エネルギー性能や再生可能エネルギー導入を評価する ZEB (net Zero Energy Building)、ZEH (net Zero Energy House) に準じた手法を施設園芸温室に適用し、ZEG (net Zero Energy Greenhouse) の定義と評価手法を開発する。さらに、ZEG の基本設計仕様を策定するため、年間を通した温室の熱収支シミュレーションモデルを開発し、カーボンニュートラル農業に対する ZEG の有効性を評価する。

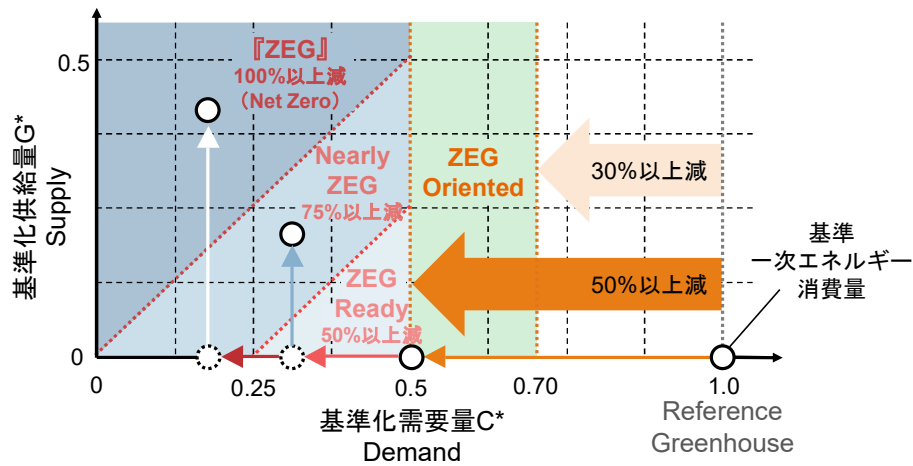
2. 主な研究成果

2.1 ZEG の定義と評価手法の開発

ZEG (net Zero Energy Greenhouse) の定性的な定義は、「作物の生産性や品質を低下させることなく、経済的に温室内の環境を維持し、負荷抑制、パッシブ手法、設備システムの高効率化等により、大幅な省エネルギーを実現したうえで、再生可能エネルギーを導入し、その結果、運用時におけるエネルギー需要と供給の年間収支が概ねゼロもしくはプラスとなる温室」とする。

ZEG の定義は、温室での生成 (再生) エネルギー (G) と消費エネルギー (C) の収支によるものとした。これは、建築物を対象とした ZEB の定義と同様である。ZEB においては、基準となるエネルギー消費量は、建築物省エネ法における基準 BEI (Building Energy-efficiency Index) = 1 を用いるが、温室に関してはこれが明確に定まっていない。BEI = 1 となるレファレンス温室の年間一次エネルギー消費量は、例えば、単層の被覆資材に重油式の暖房機等の標準的な設備が導入された温室におけるエネルギー消費量などにより定める。栽培する作物品種ごとに要求される環境条件や導入設備、設備の運用スケジュールは異なるため、建築の BEI のようにエネルギー消費の用途の集合としてではなく、ZEG においては対象とする作物に必要な用途ごとに分割して評価できる必要がある。今後、標準的な温室における用途ごとのエネルギー消費量に関するデータの蓄積が求められる。

図 1 に ZEG の評価基準を示す。レファレンス温室の年間一次エネルギー消費量で無次元化した供給量 G^* 及び基準化需要量 C^* の収支から、以下のように段階的に評価、ラベリングを行うことを提案した。



G*: 基準化供給量 = 評価対象温室の生成エネルギー／レファレンス温室の消費エネルギー
 C*: 基準化需要量 = 評価対象温室の消費エネルギー／レファレンス温室の消費エネルギー

図1 ZEG（ネット・ゼロ・エネルギー・グリーンハウス）の評価基準

$$\text{ZEG} \quad (C^* - G^*) \leq 0 \quad (1)$$

$$\text{Nearly ZEG} \quad 0 < (C^* - G^*) \leq 0.25 \quad (\text{ただし } C^* \leq 0.5) \quad (2)$$

$$\text{ZEG Ready} \quad 0.25 < (C^* - G^*) \leq 0.5 \quad (\text{ただし } C^* \leq 0.5) \quad (3)$$

$$\text{ZEG Oriented} \quad 0.5 < (C^* - G^*) \leq 0.7 \quad (\text{ただし } C^* \leq 0.7) \quad (4)$$

ここで、 G^* ：基準化供給量＝評価対象温室の生成エネルギー／レファレンス温室の消費エネルギー、 C^* ：基準化需要量＝評価対象温室の消費エネルギー／レファレンス温室の消費エネルギーである。被覆資材が固定一重の温室に対し、保温被覆を一層追加すると放熱量が約3割削減、二層追加すると約5割削減されることから、これを参照して0.7をZEG Oriented、0.5をZEG Readyの基準とした。図2にZEG評価のイメージを示す。被覆資材の複層化や高効率な設備への代替により、レファレンス温室よりも一次エネルギー消費量を削減し、PV等の再エネ導入によりネット・ゼロへ近づけることがZEGの実現に必要なとなる。

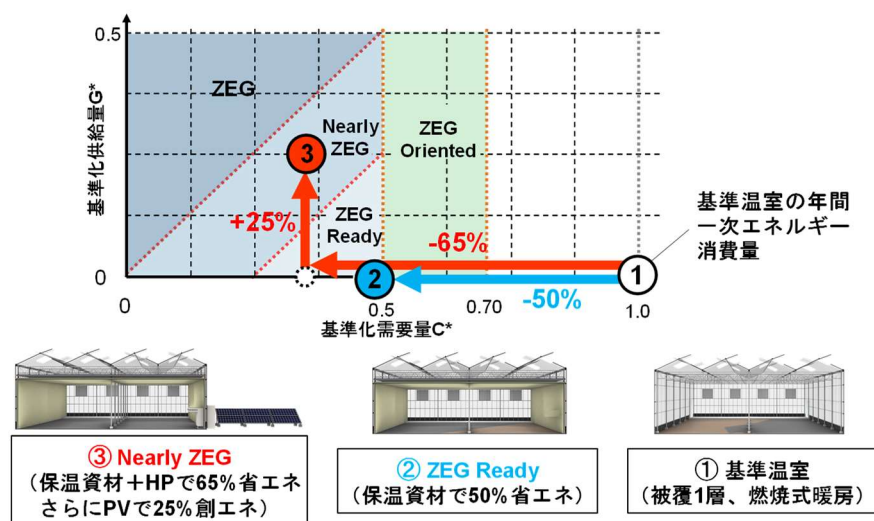


図2 ZEG 評価のイメージ

ZEG 評価における物理境界は、原則として敷地境界とする。ただし、近隣も含めた複数農場での評価が必要な場合には、仮想的な境界を設定し、物理的な境界として扱ってもよいこととする。収支境界（対象とするエネルギー消費用途）に関しては、温室の環境を維持するために必要なエネルギー消費を対象とする。温室の環境を維持するために必要なエネルギー消費用途の詳細については、温室の中で生産する園芸作物によって相違があるため、その都度検討する必要がある。

再生可能エネルギーの供給方法に関しては、基本的に、敷地内（分類Ⅰ）の再生可能エネルギーを対象とする。例えば、敷地内に太陽光発電パネルが設置されており、11 棟の温室がある場合、太陽光パネルによる発電電力を全棟の温室で均等割りするか、実際には 3 棟の温室で利用している場合には、利用している温室で按分できることとする。例えば、住宅用に設置された PV などは ZEG の評価にカウントしない。また、温室用の再生可能エネルギーの一部が住宅に供給された場合は、その分を除いて ZEG を評価する。敷地外で生成する再生可能エネルギーを利用する場合、換算係数などを明示できれば、分類Ⅱ、分類Ⅲも含めることができる。

ここで、分類Ⅰ：敷地内で生成される再生可能エネルギーを利用するもの、分類Ⅱ：敷地外で生成される再生可能エネルギーソースを電気や熱に変換して利用するもの（バイオマス等）、分類Ⅲ：Ⅰ、Ⅱに加え、敷地外で生成される再生可能エネルギーをそのまま利用するものとする。なお、再生可能エネルギーに関しては 2022 年省エネ法の改正により、定義の見直しが行われた。

評価指標は、原則として一次エネルギー消費量とするが、エネルギー使用量に係数を乗じた指標、例えば運用時の CO₂ 排出量やエネルギーコストによる定義も可とする。その場合には、地球温暖化対策の推進に関する法律又は地方自治体が定める排出係数を使用し、エネルギーコストについては、都度設定する。

再生可能エネルギー利用は式（5）に示す再生可能エネルギー利用率で評価する。また、非化石エネルギー利用は式（6）に示す非化石エネルギー利用率で評価する。

$$\text{再生可能エネルギー利用率} = \Sigma \text{RE} / (\Sigma \text{RE} + \Sigma \text{PE}) \quad (5)$$

$$\text{非化石エネルギー利用率} = \Sigma \text{NFE} / (\Sigma \text{NFE} + \Sigma \text{FE}) \quad (6)$$

ここで、 ΣRE ：再生可能エネルギーの総和、 ΣPE ：非再生可能エネルギーの総和、 ΣNFE ：非化石エネルギーの総和、 ΣFE ：化石エネルギーの総和である。

さらに、ZEG を目指した温室においても、園芸作物の生育に適した環境を維持する必要がある。温室内の気温や地温については、作物の品目や品種ごとの生育適温を維持することが求められる。また、光合成に適した光量や CO₂ 濃度の調整、生育や形態形成に適した湿度の管理、土壌の管理等が適切である必要がある。ZEG を目指した温室では、単位面積当たりの園芸作物の生産性や品質が従来よりも低下していないことが求められる。

2.2 ZEG 評価に向けた温室のエネルギー消費量に関するシミュレータの開発

(1) シミュレータの概要

図 3 に開発中のシミュレータで計算する要素の概念図、図 4 に熱・換気計算における質点の設定例とシミュレータのインターフェースの一部を示す。建築分野で広く用いられるエネルギーシステムシミュレーション『TRNSYS』および拡張機能『TRNFlow』を用い、温室の熱収支計算に基づいた一次エネルギー消費量、CO₂ 排出量等を計算するシミュレータを開発した。

本シミュレータでは建築の 3 次元形状を入力し、熱・換気連成計算の質点を設定する。例えば、

温室内に遮光カーテンや保温カーテンがある場合、これらによって区切られる空間を異なる質点として設定する。温室内の各質点間と、気象条件を入力した屋外の間に発生する熱や空気の移動を動的に計算する。被覆資材の熱貫流率、日射透過率、放射率などは波長別に入力することが可能であり、一般的な農業用のフィルムや、波長選択型の積層フィルムの物性なども入力することが可能である。室内の遮光・保温カーテンの日射透過率や熱抵抗値などの物性を入力し、温室内外の環境条件に従った開閉制御も再現可能である。地中伝熱や隙間換気、窓開閉による自然換気の計算も行われる。温室内の冷暖房機の設定も可能であり、ZEG の実現に向けた要素技術の一つであるヒートポンプ式の冷暖房機や、燃焼式とヒートポンプ式のハイブリッド暖房機の運転も再現する。また、ZEG に向けた温室における再生可能エネルギーの供給源として、太陽光発電量の計算も併せて行うことが可能である。その他、Leaf Area Index と日射量などの環境条件に応じて計算される、作物からの蒸散の影響も今後はモデルに含める予定である。

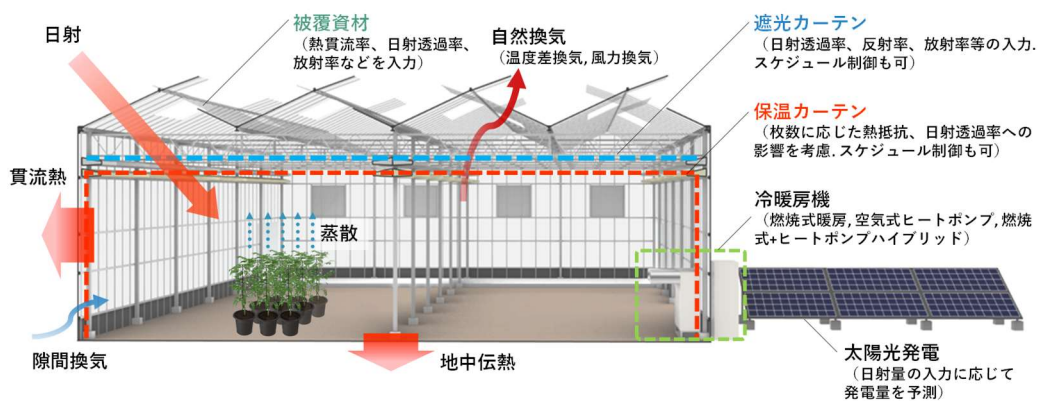


図 3 開発中のシミュレータで計算する要素の概念図

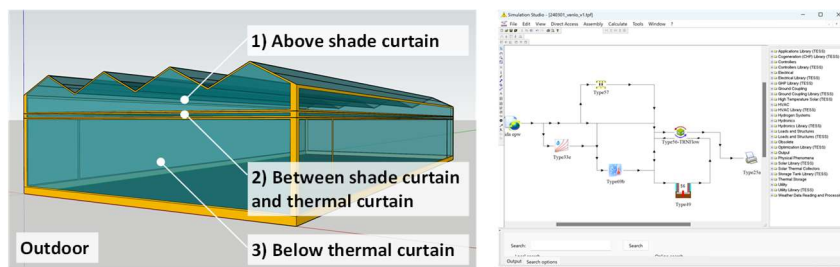


図 4 熱・換気計算における質点の設定例（左）とインターフェースの一部（右）

図 5 に規模 3.8 a のフェンロー型温室の室温および暖房負荷の計算例を示す。前述の要素を勘案しながら温室の熱負荷計算を行うことで、時刻別の冷暖房の負荷が計算される。これに基づき、年間の冷暖房エネルギー消費量を計算する。ZEG の評価は年間の一次エネルギー消費量・生成量を用いて行うため、エネルギー供給源（A 重油、系統電力、太陽光発電電力など）ごとのエネルギー消費量に対して、一次エネルギー換算係数を乗じることで、年間の一次エネルギー消費量を算出する。その際に、エネルギー供給源ごとのエネルギー消費量に CO_2 排出係数を乗じることで、年間の CO_2 排出量を評価できる。これにより、ZEG 仕様の温室の低炭素化の効果を評価することができる。レファレンス温室の一次エネルギー消費量を計算した上で、評価対象温室の一次エネルギー消費量および生成量の比を計算することで、ZEG 達成度の段階的な評価に用いる。

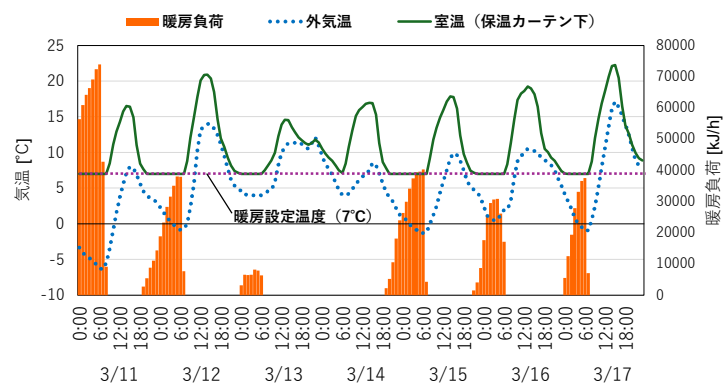


図5 規模3.8 aのフェンロー型温室の室温および暖房負荷の計算例（ある1週間の計算例を示している。ZEGの評価では、年間の熱負荷計算から冷暖房の一次エネルギー消費量を算出する）

(2) 精度検証と計算例

開発中のシミュレータの計算精度の検証を目的に、長野県駒ヶ根市のイチゴを栽培する温室を対象に、年間暖房1次エネルギー消費量の計算値と実測値を比較した。温室の規模は18 m × 55 mの南北棟であり、農業用ポリオレフィン系特殊フィルムの被覆資材に加え、保温資材としてポリエチレンフィルムが天井と側面に備えられていた。本温室ではイチゴが栽培されており、熱出力116 kWの温風暖房機（ネポン製）が1台導入されている。最低管理温度は7°Cであった。2021年度の冬季には、暖房用に4.20 kLのA重油が購入されていた。A重油の購入量が使用量と等しいと仮定し、A重油の一次エネルギー換算係数39.1 GJ/kLを用い、A重油による暖房一次エネルギー消費量を $4.20 \times 39.1 = 164.2$ GJとした。

開発したシミュレータを用いた計算には、長野県飯田市のTMY x 気象データ（2004-2018年版）を用いた。被覆資材と保温カーテンの物性は、POフィルム：U値6.35 W/m²K、PEフィルム：U値6.80 W/m²Kの2層とし、日射透過率はいずれの資材も86%として計算した。換気回数は0.5回/hとして計算した。暖房の設定温度は7°Cとして熱負荷を計算した。計算した年間熱負荷を燃焼式暖房機の熱効率0.90で除してA重油による年間暖房一次エネルギー消費量の計算値とした。その結果、年間の暖房一次エネルギー消費量の計算値は172.9 GJとなった。図6に年間暖房一次エネルギー消費量の測定値と計算値の比較を示す。計算値は実測値の105%となり、一定の計算精度が確認された。今後、暖房以外の用途による実測データを含めた検証も行うなど、調査事例を増やして精度を確認する必要がある。

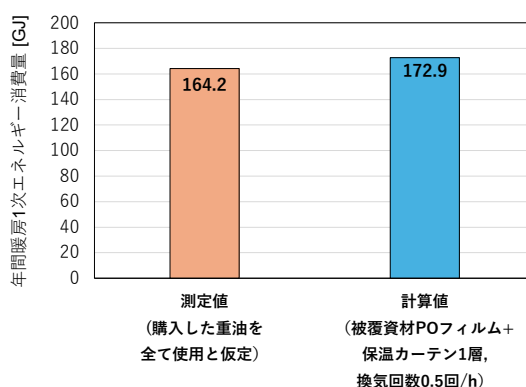


図6 年間暖房一次エネルギー消費量の測定値と計算値の比較

図7に被覆資材の複層化が年間暖房1次エネルギー消費量に与える影響の分析例を示す。図6で計算したものと同一温室のモデルと気象データ、設定温度（7℃）のもとで、被覆資材1層から保温カーテンを1,2層追加した場合の年間暖房熱負荷を計算した。カーテンの追加で熱貫流率や日射取得率、換気回数が変化するよう入力している。カーテン1層追加で年間の暖房一次エネルギー消費量が約3割減、2層追加で約5割減となっており、既往研究と同様の傾向が得られた。被覆資材とカーテンの複層化によるエネルギー消費量の削減効果を再現できていると考えられる。

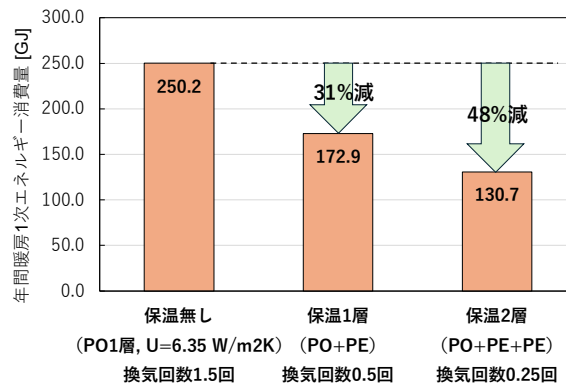


図7 被覆資材の複層化が年間暖房1次エネルギー消費量に与える影響の分析例

2.3 まとめ

令和5年度は以下の成果が得られた。

- ZEG (net Zero Energy Greenhouse) の定義と評価手法を提案し、査読付き論文として採択・公開された。(菅野 颯馬, 小川 裕太郎, 石井 雅久, 田辺 新一, 温室と農場のネット・ゼロ・エネルギー及びエミッションに関する定義と評価方法の開発, 日本建築学会技術報告集, 2024年30巻74号 p. 251-256, <https://doi.org/10.3130/aijt.30.251>) ZEG の定義に倣い、温室の年間一次エネルギー消費量・生成量に応じて、段階的なラベリングを行うものとした。今後、評価の基準となる一次エネルギー消費量を、温室の規模や作物、気象条件等に応じて適宜定める必要がある。
- 温室の熱収支計算に基づいた1次エネルギー消費量等を計算するシミュレータの作成を進めた。被覆資材やカーテンの光学特性、設備機器の運用、窓やカーテンの開閉運用、隙間換気、地中伝熱、植物の蒸散等を複合的に考慮できるシミュレータとし、ZEG の評価に応用可能とした。

3. 共同研究者

田辺 新一（創造理工学部建築学科 教授）

4. 研究業績

4.1 学術論文

- 1) 菅野 颯馬, 小川 裕太郎, 石井 雅久, 田辺 新一, 温室と農場のネット・ゼロ・エネルギー及びエミッションに関する定義と評価方法の開発, 日本建築学会技術報告集, 2024, 30 巻, 74 号, p. 251-256, 公開日 2024/02/20, Online ISSN 1881-8188, Print ISSN 1341-9463, <https://doi.org/10.3130/aijt.30.251>
- 2) 田崎 未空, 菅野 颯馬, 小池 潤, 兒玉 花朋, 田辺 新一, 個室型執務空間における疑似窓が利用者の心理と知的生産性に与える影響, 日本建築学会環境系論文集, 2023, 88 巻, 813 号, p. 838-849, 公開日 2023/11/01, Online ISSN 1881-817X, Print ISSN 1348-0685, <https://doi.org/10.3130/aije.88.838>
- 3) 玉城 磨, 菅野 颯馬, 石井 雅久, 佐瀬 勘紀, 高倉 直, 温室内の平均日射量の測定, 農業施設, 2023, 54 巻, 2 号, p. 37-42, 公開日 2023/10/21, Online ISSN 2186-0122, Print ISSN 0388-8517, https://doi.org/10.11449/sasj.54.2_37
- 4) 菅野 颯馬, 田崎 未空, 大庭 檀, 高橋 秀介, 田辺 新一, 窓と観葉植物を併置した室内での心理的効果と眼球運動に関する被験者実験, 日本建築学会環境系論文集, 2023, 88 巻, 807 号, p. 375-386, 公開日 2023/05/01, Online ISSN 1881-817X, Print ISSN 1348-0685, <https://doi.org/10.3130/aije.88.375>

4.2 総説・著書

菅野 颯馬, 田辺 新一, バイオフィリックデザインの現在と未来, BELCA news 35(184) 20-24 2023 年 7 月

4.3 招待講演

Soma Sugano, Concepts of net Zero Energy Building and House in Japan, Indonesia's Ministry of Public Works and Public Housing Webinar "Green Housing and Sustainable Settlements" 2023 年 11 月 1 日

4.4 受賞・表彰

第 44 回東北建築賞「作品賞」, 盛岡の家, 日本建築学会東北支部

4.5 学会および社会的活動

- 1) Soma Sugano, Masahisa Ishii, Shin-ichi Tanabe, Study on the lighting requirements of indoor ornamental plants using growth chambers, 18th Healthy Buildings Europe Conference, 11th - 14th June 2023, Aachen, Germany
- 2) Seyyed Abbas Noorian Najafabadi, Soma Sugano, Philomena M. Bluysen, Impact of carpets on perceived indoor air quality, The 11th International Conference on Indoor Air Quality, Ventilation & Energy Conservation in Buildings (IAQVEC2023) 2023 年 6 月
- 3) 菅野 颯馬, 小川 裕太郎, 石井 雅久, 田辺 新一, 温室および農場のゼロ・エネルギー化に関

- する研究 第1報 ZEG および ZEF の定義と評価手法の開発, 空気調和・衛生工学会大会, 福井, 2023
- 4) 小川 裕太郎, 菅野 颯馬, 石井 雅久, 田辺 新一, 温室および農場のゼロ・エネルギー化に関する研究 第2報 ZEG および ZEF の実現に向けた設備要件の検討, 空気調和・衛生工学会大会, 福井, 2023
 - 5) 奥山 博康, 菅野 颯馬, 住宅用の二重ダクト熱回収換気方式の考案と性能検討, 空気調和・衛生工学会大会, 福井, 2023
 - 6) 兒玉 花朋, 菅野 颯馬, 小池 潤, 赤松 奈美, 瀬戸 南也, 田辺 新一, Active Plant System の培地が室内の温熱環境および室内空気質に与える影響, 福井, 2023
 - 7) 菅野 颯馬, 田辺 新一, 屋内緑化空間が在室者の認知機能に与える影響に関する文献レビュー, 日本建築学会大会 (近畿), 2023
 - 8) 兒玉 花朋, 菅野 颯馬, 小池 潤, 赤松 奈美, 瀬戸 南也, 田辺 新一, Active Plant System における培地の種類が通風時の保水量および吹出口の温熱環境に与える影響, 日本建築学会大会 (近畿), 2023

5. 研究活動の課題と展望

次年度はシミュレータを完成させた後に、温室の建築・設備性能、気象データ、栽培管理温度などを変数とし、ZEG を実現可能な設備の条件を探索的に分析することを検討している。これにより、ZEG の普及に向けた外皮性能・設備の要求水準を定量的に明確化することを目指す。