

T-Green[®] Multi Solar シースルータイプの Low-E 膜反射日射による発電向上に関する研究

太陽電池セルの屋内側表面への入射日射のシミュレーション検証

梅田 和彦^{*1}・山口 亮^{*2}・小林 信郷^{*3}・宮嶋 禎朗^{*3}

Keywords : double-side power generation, mono-crystal solar cells, low-e double glazing, simulation

両面発電, 単結晶 Si 太陽電池, Low-E 複層ガラス, シミュレーション

1. はじめに

ZEB の普及拡大には太陽光発電の建物適用が重要である。壁面に太陽電池モジュール (PV: Photovoltaic module) を設置する場合, 屋上の様に設備機器等で設置場所が限定されることは少なく, 今後の需要拡大が予想される。一方, 壁面には屋上より周囲から見えやすいという特徴があり, 建物意匠に融合する PV の要望も増えることが予想される。特に窓に設置する採光型 PV には, 高い意匠性と発電性能の他に, 眺望, 採光, 遮熱, 断熱の窓の基本的機能も合わせて必要になる。

以上の状況を踏まえ, 筆者らは両面発電による新しい採光型 PV (T-GMSS: T-Green Multi Solar see-through type) を検討した。既報^{1) 2) 3)}では T-GMSS の Low-E^{注1)}

膜反射日射による発電向上効果を屋外検証した結果を報告した。本報では, Low-E 膜反射日射の太陽電池セルの屋内側表面への入射特性についてシミュレーションで確認した既報^{4) 5)}の結果を加筆修正して報告する。

2. T-Green Multi Solar シースルータイプ

短冊状に加工した両面発電可能な単結晶 Si 太陽電池セル⁶⁾を長手方向に連結して線状の太陽電池セルを製作し, 開口率 50%で上下に均等間隔で配置した PV を, Low-E 複層ガラスの屋外側ガラスとして組み込む⁷⁾ことにより, 眺望, 採光, 遮熱, 断熱, 発電が同時に成

立することが T-GMSS の特長である。

Low-E 膜は日射の近赤外成分を主に反射する⁸⁾ため, 近赤外域に最大吸収波長を有する太陽電池セル⁶⁾の屋内側表面での発電が可能になる。

本研究で検討した T-GMSS の概念を図-1 に示す。

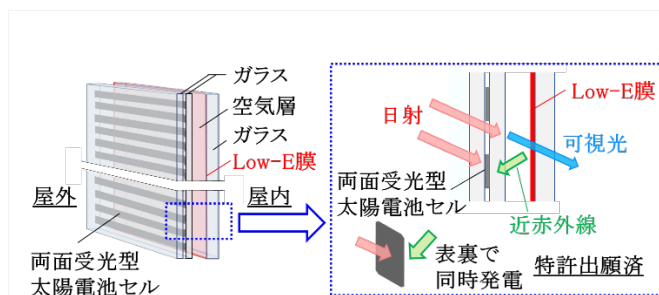


図-1 T-Green Multi Solar シースルータイプの概念
Fig.1 Concepts of T-Green Multi Solar See-through Type

3. シミュレーション検証

Low-E 膜の反射特性は入射角と反射角が等しい正反射になる。そのため, T-GMSS では太陽の動きに伴って Low-E 膜で反射した近赤外線が太陽電池セルの屋内側表面に入射する場合と隣接する太陽電池セルとの間の開口部から屋外側に透過する場合が交互に発生すると考えられる。また, 一般的な正方形の太陽電池セルより線状の太陽電池セルの方が太陽電池セルの屋内側表面に Low-E 膜で反射した近赤外線が入射する割合が大きくなると予想される。これらの状況を屋外で詳細に検証することは困難であると判断したため, シミュレーションで検証を行った。

*1 技術センター 都市基盤技術研究部 空間研究室

*2 設計本部 設備計画部

*3 クリーンエネルギー・環境事業推進本部 ZEB・スマートコミュニティ部

3.1 計算概要

3.1.1 計算モデル

計算モデルの主な仕様を表-1 に示す。比較する採光型 PV は、モデル 1 (T-GMSS) と、モデル 2 (正方形の太陽電池セルを使用した採光型 PV との Low-E 複層) の 2 種類である。計算では放射解析⁹⁾を行った。

計算領域は 250mm 角で奥行 22mm の空間を構造格子で分割し、ラジオシティ法で放射解析を行った。ここで、太陽電池セルの封止材の厚さについては、計算負荷削減のため省略した。

図-2 に計算モデルの太陽電池セルの配置と断面構成を示す。モデル 1 とモデル 2 共に太陽電池セルを高透過ガラス (5mm 厚) 2 枚で挟んだ合わせガラスが屋外側に、Low-E 膜がある面を空気層側にした Low-E ガラスを屋内側に配置して、太陽電池セルの形状と配置のみが異なる仕様にした。PV の寸法は両モデル共に幅 1,200mm、高さ 2,800mm のモジュールにして、開口率 50% で太陽電池セルを配置した場合を想定した。

表-1 計算モデルの主な仕様
Table 1 Calculation model specifications

計算モデル	モデル 1					モデル 2				
採光型 PV	T-Green Multi Solar シースルータイプ (T-GMSS)					正方形の太陽電池セル使用による Low-E 複層				
モデル寸法	250mm (W) × 250mm (H) × 22mm (D)					250mm (W) × 250mm (H) × 22mm (D)				
部材	外枠	セル (外)	セル (内)	高透過ガラス	Low-E ガラス	外枠	セル (外)	セル (内)	高透過ガラス	Low-E ガラス
ポリゴン数	8	6,250	6,250	25,000	12,500	8	5,780	5,780	25,000	12,500
合計		50,008					49,068			

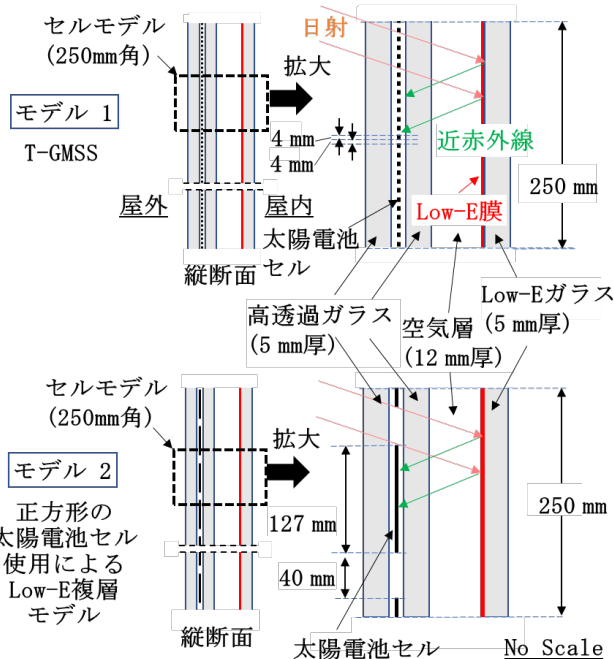


図-2 計算モデルの材料構成

Fig.2 Material structure of calculation model

モデル 1 は、高さ 4mm の線状の太陽電池セルが上下

に 4mm の間隔を空けて均等に配置されている。一方、モデル 2 の太陽電池セルは標準的な 127mm 角で、モジュールの 4 辺の端部で調整用の余白を取り、隣接する太陽電池セルとの間隔を縦横 40mm で均等に配置されている。

シミュレーションの計算モデルは、太陽電池セルならびに隣接する太陽電池セルとの隙間という基本的な構成要素を含む最小モデル (セルモデル) とした。モデル 2 では太陽電池セルを中央に配置した開口率約 50% の 250mm 角に設定し、モデル 1 も同じ 250mm 角にして太陽電池セルの屋内側表面に入射する Low-E 膜反射日射に関する比較を行った。

両モデルで使用した高透過ガラスの透過率と反射率の入射角特性には、透過率が入射角 0 度で約 90% の高透過ガラスの文献¹⁰⁾を参考に設定した。一方、反射率については、Low-E ガラスの入射角特性の公表データがないため、文献¹⁰⁾の Low-E 複層ガラスの入射角 0 度における反射率が 40% 程度で高いデータを参考にした。

3.1.2 計算ケース

計算ケースを表-2 に示す。計算ケースは、夏至、冬至、春分の 3 日分に限定する他、計算対象時刻を直達日射が入射する時間帯で対称性を考慮して、方位を南と西の 2 方位に限定した。また、指向性の直達日射が太陽電池セルの屋内側表面への入射に及ぼす影響が大きいと考えられるため、天気を快晴で仮定した。計算対象地点は東京である。

表-2 計算ケース
Table 2 Calculation case

対象日	天気	地点	方位	時間帯
夏至、冬至、春分	快晴	東京	南	8時～12時
			西	13時～17時

3.2 計算結果

3.2.1 太陽電池セル屋内側表面の入射日射量

図-3 に、夏至、冬至、春分の快晴日における太陽電池セル屋内側表面への入射日射量を示す。

夏至の南面の場合、太陽高度は高く (南中時: 約 78 度)、入射角は 8 時から 12 時の時間帯で 77 度から 90 度の範囲で PV 屋外側表面の垂直方向に対して大きな角度で入射するため表面の反射が増えて入射日射量は少なくなり、太陽電池セル屋内側表面へ入射する反射日射量も少なくなる。一方、西面の場合、太陽高度が南中時から夕方にかけて低下することによって入射角は 13 時の約 72 度から 17 時の約 25 度まで低下する。西面の

場合の入射角は南面の場合と比較すると小さいため、入射日射量は多くなり Low-E 膜からの反射日射量も多くなる。モデル1の太陽電池セル屋内側表面入射の反射日射量の最大は西面 16 時で 139W/m^2 で、同じ西面 16 時でモデル2の 56W/m^2 の約 2.5 倍である。太陽電池セル屋内側表面に入射する Low-E 膜反射日射量の合計値は、南面では入射量が少なく差は小さいが、西面ではモデル2が 213W/m^2 に対してモデル1は 363W/m^2 で約 1.7 倍である。

冬至の南面の場合、太陽高度は低く（南中時：約 30 度）、入射角は 30 度から 50 度程度であるため、PV の屋外側表面に比較的に入射しやすく、隣接する太陽電池セルとの間の開口部に入射する日射量は多くなる。一方、西面の場合、太陽高度は南中時から夕方にかけて低下することに伴って入射角は 13 時の約 71 度から 17 時の約 25 度まで低下するため入射しやすくなるが、日射量が多い時間帯で入射角が大きく、日射量が少ない時間帯では入射角が小さいという関係で冬至の南面よりは入射日射量は少なくなり Low-E 膜で反射する日射量も少なくなる傾向がある。モデル1の太陽電池セル屋内側表面入射の反射日射の最大は南面 12 時で 149W/m^2 で、同じ南面 12 時でモデル2の 60W/m^2 の約 2.5 倍である。太陽電池セル屋内側表面に入射する Low-E 膜反射日射量の合計値は、南面ではモデル2が 292W/m^2 に対してモデル1は 406W/m^2 で約 1.4 倍で、西面でもモデル2が 128W/m^2 に対してモデル1は 172W/m^2 で約 1.4 倍である。

春分の場合、南面はモデル1がモデル2より多く推移する。モデル1の太陽電池セル屋内側表面に入射する反射日射量の最大は 12 時で 94W/m^2 で、同じ時刻のモデル2の 55W/m^2 の約 1.7 倍である。一方、西面ではモデル1はモデル2より 13 時、14 時、15 時では少なく、16 時と 17 時では多くなる。モデル1の太陽電池セル屋内側表面に入射する反射日射量の最大は 16 時で 126W/m^2 で、同じ時刻のモデルの 51W/m^2 の約 2.5 倍であった。太陽電池セル屋内側表面に入射する Low-E 膜反射日射量の合計値は、南面ではモデル2が 228W/m^2 に対してモデル1は 314W/m^2 で約 1.4 倍となり、西面でもモデル2が 209W/m^2 に対してモデル1は 296W/m^2 で約 1.4 倍であった。

以上の結果から、8 時から 17 時の 1 時間毎の夏至、冬至、春分の太陽電池セル屋内側表面に入射する反射日射量は、夏至で南面の計算モデルによる差が小さい場合を除き、モデル1はモデル2より多い傾向があるが、一部の時刻で逆転している。理由としては、Low-E

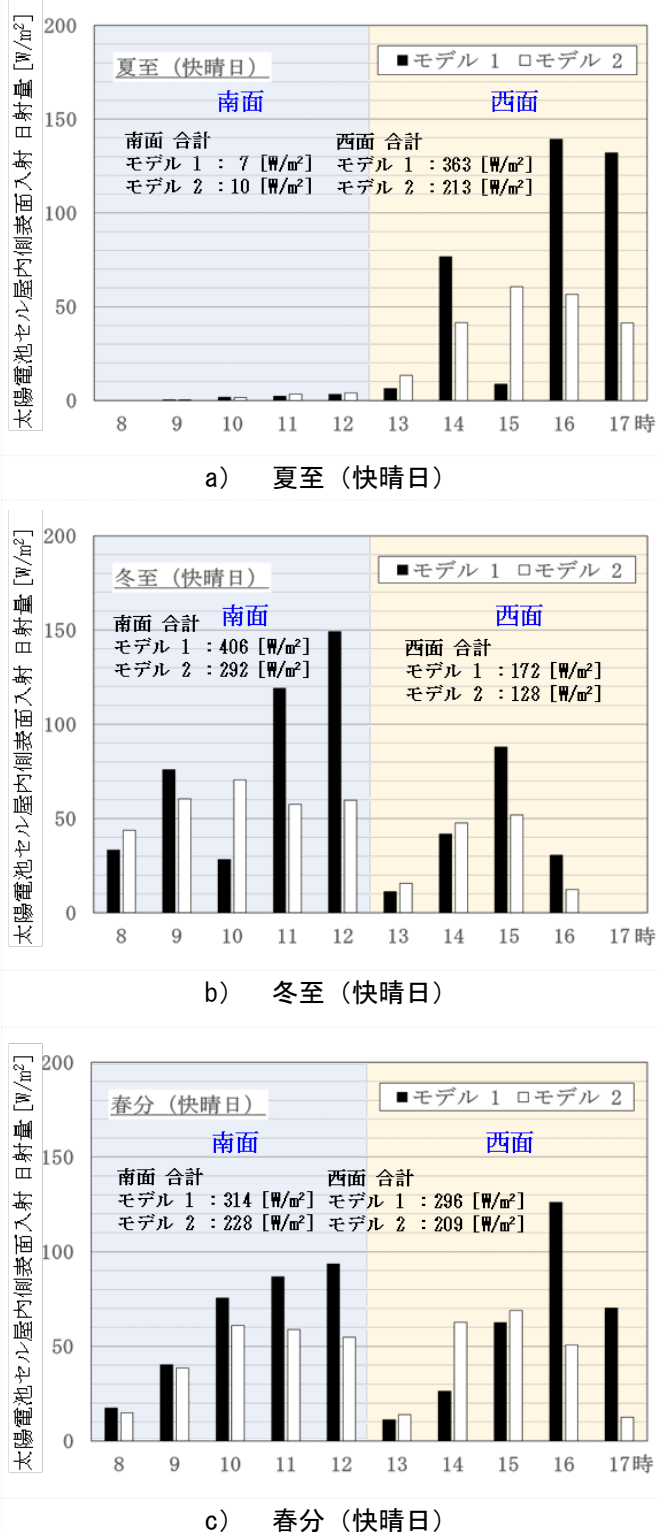
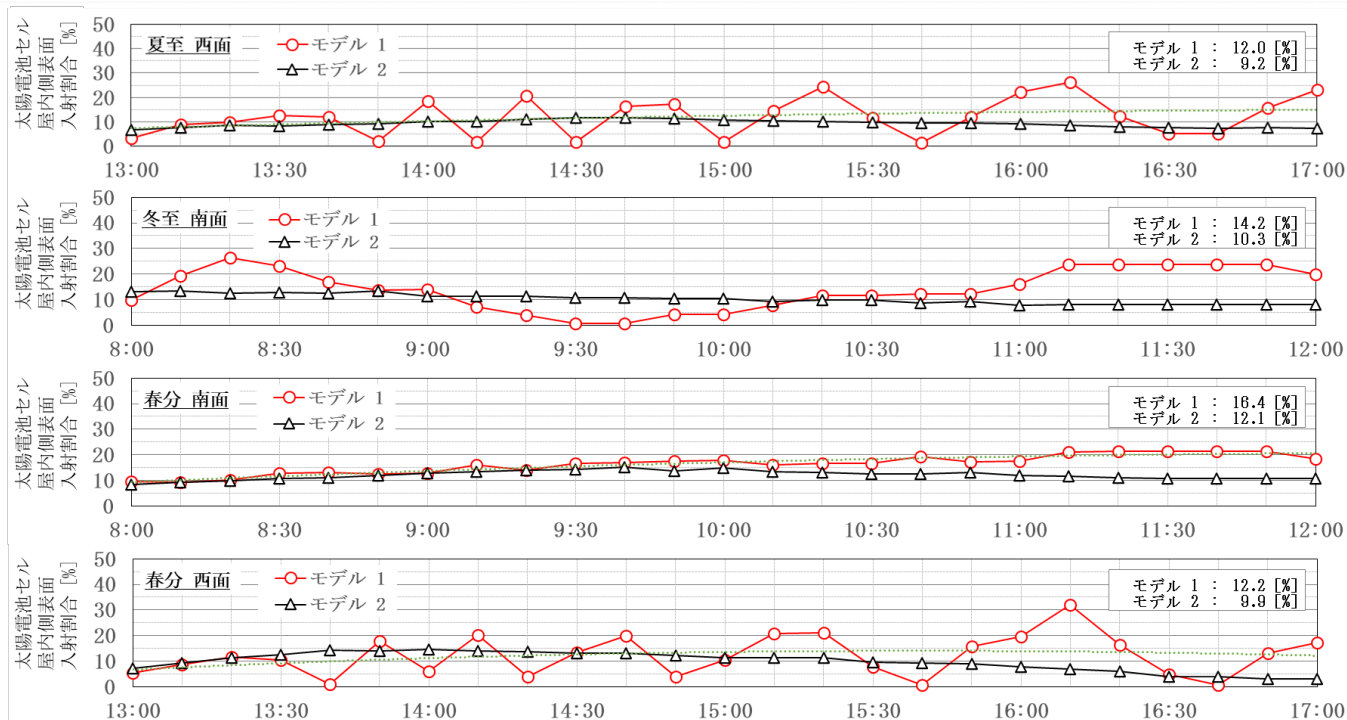


図-3 太陽電池セル屋内側表面入射の日射量

Fig.3 Incident radiation on the indoor side of solar cells

膜で反射した日射が太陽電池セル屋内側表面に入射せず、モデル1の隣接する太陽電池セルの間の開口部から屋外側に透過することが考えられる。そのため、計算間隔を1時間より短い間隔に変更して推移の詳細を調査した。その結果について、次節で述べる。



注) 各グラフの右上に、太陽電池セル屋内側表面への反射日射入射割合の平均を示す。

$$\text{太陽電池セル屋内側表面入射割合}[\%] = \frac{\text{太陽電池セルの屋内側入射日射量}}{\text{太陽電池セルの屋外側入射日射量}} \times 100$$

※ 10 分値の平均

図-4 太陽電池セル屋内側表面入射の日射量

Fig.4 Incident radiation on the indoor side of solar cells

3.2.2 太陽電池セル屋外側に対する屋内側の入射割合

図-4 に太陽電池セル屋内側に入射する Low-E 膜反射日射量の同セル屋外側に入射する日射量に対する割合を 10 分間隔で示す。夏至は太陽電池セル屋内側表面に入射する日射量が多い西面を、冬至は入射日射量が多い南面を、春分は南面と西面の入射日射量が同程度であるので両方について示す。

モデル1の推移には春分の南面を除き、大きく変動する現象がみられる。これは前述したように、Low-E 膜で反射した日射が太陽電池セル屋内側表面に入射せずにモデル1の隣接する太陽電池セルとの間の開口部から屋外側に透過することと、太陽電池セル屋内側表面に入射することが交互に発生していることを示唆している。

太陽電池セル屋外側に対する屋内側への入射割合は、比較した全てのケースの時間帯平均でモデル1は13.7%に対しモデル2は10.4%となり、モデル1がモデル2より太陽電池セル屋内側表面に入射する日射量が多くなることがわかった。入射日射量が多いと発電量が多くなるため、モデル1はモデル2よりも発電性能は高くなることが示唆される。

なお、春分の南面のモデル1の推移に大きく変動する

傾向がみられないのは、上下方向に間隔を空けて配置された線状太陽電池セルの屋内側に Low-E 膜反射日射が安定して入射していることを示唆している。

3.2.3 太陽電池セル入射日射量と入射角の関係

図-5 に太陽電池セルへの入射日射量と入射角の関係を示す。計算対象期間は夏至から冬至の半年間で、1 週間の間隔で計算した。方位は南面で南中時刻における入射日射量を示す。計算対象地点が東京であるため、入射角の範囲が約 80 度から約 30 度である。

太陽電池セルの屋外側への入射日射量が両モデルでほぼ一致して入射角が大きくなると減少する傾向があることに対して、モデル2の屋内側への入射日射量も同様の傾向がある。一方、モデル1では屋内側への入射日射量の推移に大きく変動する現象がみられ、入射角が大きくなると振幅幅を縮小しながら減少する傾向がある。これは図-4 で示した大きな変動の理由と同じで、入射角に対しても Low-E 膜で反射した日射が太陽電池セル屋内側表面に入射せずに隣接する太陽電池セルの間の開口部から屋外側に透過することと、太陽電池セル屋内側に入射することが交互に発生することを示唆している。

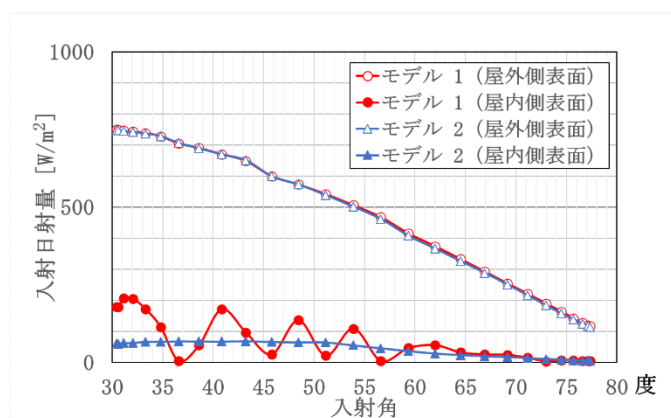


図-5 入射角と入射日射量 (南面, 南中, 夏至~冬至)
Fig.5 Angle of incidence and incident radiation
(South side, meridian transit, summer solstice-winter solstice)

4. まとめ

本研究では、Low-E 複層ガラスの屋外側ガラスとして開口率 50%で PV を組み込んだモデルで、モデル 1 (線状の両面受光型太陽電池セルを上下に均等配置) と、モデル 2 (一般的な四角形の両面受光型結晶 Si 太陽電池セルを使用) について、太陽電池セルの屋内側表面に入射する Low-E 膜反射日射を比較するシミュレーションを行った。得られた主な知見を以下に示す。

- ① 太陽電池セル屋外側入射日射量に対する屋内側入射日射量の割合を比較した。全計算ケースの平均は、モデル 1 が 13.7%に対しモデル 2 は 10.4%で、モデル 1 がモデル 2 より太陽電池セル屋内側に入射する日射量は多くなり、モデル 1 の発電優位性を示した。
- ② モデル 1 で太陽電池セルの屋内側入射日射量の推移に大きく変動する現象がみられた。これは Low-E 膜で反射した日射が隣接する太陽電池セルの間の開口部から屋外側に透過することと、太陽電池セル屋内側表面に入射することが交互に発生していることを示唆している。

謝辞

本研究において、株式会社カネカの PV 関係者から多大なるご協力を頂きました。ここに記して深く感謝いたします。

注

注1) Low-Emissivity (低放射) の略称。Low-E 膜は特殊な金属膜をガラス等にコーティングして製膜する。Low-E 膜は日射を遮蔽する特徴があり、主に非住宅の建物の窓ガラスに採用されている。

参考文献

- 1) 梅田和彦：次世代シースルー太陽電池モジュールの屋外暴露検証，日本建築学会大会学術講演会梗概集，pp.31-38，2020.
- 2) 梅田和彦，山口亮，小林信郷：次世代シースルー太陽電池モジュールの屋外検証 発電と日射遮蔽の効果，大成建設技術センター報，第 53 号，pp.47-1-47-4，2020.
- 3) 梅田和彦，山口亮，宮嶋禎朗，中島昭彦：次世代シースルー太陽電池モジュールの屋外検証 その 2 線状発電セルの方向性による発電量の比較，日本建築学会大会学術講演会梗概集，pp.1805-1806，2024.
- 4) 梅田和彦，山口亮：線状の両面発電セルを均等配置した採光型太陽電池モジュールの窓設置に関する研究 シミュレーションによる発電向上効果の検証，日本建築学会大会学術講演会梗概集，pp.1909-1910，2023.
- 5) 梅田和彦，山口亮：線状の両面発電セルを均等配置した採光型太陽電池モジュールの Low-E 膜反射日射による窓の発電向上に関する研究，日本建築学会環境系論文集，pp.399-409，2024.
- 6) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (共同研究先) 株式会社カネカ：2015 年度～2019 年度成果報告書 高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発/先端複合技術型シリコン太陽電池，高性能 CIS 太陽電池の技術開発/結晶 Si 太陽電池をベースとした複合型太陽電池モジュールの開発，報告書管理番号 20200000000580
- 7) 門田直樹，前田賢吾，蔵岡明弘，牧野司，中島昭彦，梅田和彦，小林信郷，山口亮：ZEB 実現に向けた外装一体型太陽電池モジュールの開発 (その 1) シースルー型太陽電池の基本性能，日本太陽エネルギー学会講演論文集，pp.145-146，2020.
- 8) 大槻東洋，近江伸，中嶋弘：低放射率ガラスによる省エネルギー，日本赤外線学会誌，第 7 巻 第 2 号，1997.
- 9) 大黒雅之，森川泰成，ss：街区スケールを対象としたヒートアイランド解析評価プログラムの開発と適用，プログラムの概要および未来都市の解析事例，大成建設技術センター報 第 42 号，pp.49-1 - 49-82，2009/
- 10) 日本板硝子株式会社：ガラス建材 総合カタログ 技術資料編，日本板硝子株式会社・日本板硝子ビルディングプロダクツ株式会社，pp.24-25，2020.