

# 太陽光発電と太陽熱発電のハイブリッド化に向けた 集熱部における輻射熱伝導解析

Radiant Heat Transfer Analysis in Heat Collector for Hybrid and Solar Power Generation

金川朋暉<sup>1)</sup>, 竹内優哉<sup>2)</sup>, 菊地哲平<sup>1)</sup>, 中村正行<sup>3)</sup>

Tomoki Kanagawa, Yuya Takeuchi, Teppei Kikuchi and Masayuki Nakamura

1) 信州大学大学院 (〒380-8553 長野県長野市若里4-17-11, E-mail: 23w4023j@shinshu-u.ac.jp)

2) 信州大学工学部 (〒380-8553 長野県長野市若里4-17-11, E-mail: 20t4068a@shinshu-u.ac.jp)

3) 博(工) 信州大学 工学部 教授 (〒380-8553 長野県長野市若里4-17-11, E-mail: maxnaka@shinshu-u.ac.jp)

In this paper, we analyzed radiant heat transfer in a heat collector, considering wavelength dependence, to hybridize photovoltaic and solar thermal power generation. Optical multilayer film that separates the transmitted and reflected wavelength ranges to achieve hybridization is attached to solar panels. We implemented the wavelength dependence of the reflectance of the multilayer film, the absorption rate of the heat collecting part, and the reflected light concerning the solar orbit. We analyzed the unsteady temperature distribution of the heat collecting part by coupled analysis of ray tracing and radiant heat transfer analysis. The temperature of the heat collector is affected by the absorption coefficient of the reflector and the surface of the heat collector, energy loss due to reflectance, and wavelength limitations when an optical multilayer film is attached to the solar cell.

**Key Words :** Radiant Heat Transfer Analysis, Solar Radiation, Solar Thermal Power Generation

## 1. はじめに

再生可能エネルギーを利用した発電のなかでも、太陽エネルギーを利用した発電は、特に普及が進んでいる。太陽エネルギーを利用する発電方法には、主に太陽光発電と太陽熱発電の2種類が存在する。太陽光発電は太陽エネルギーを太陽電池パネルによって電気エネルギーに変換する方法である。太陽熱発電は太陽光を反射鏡によって集光し集熱部に熱エネルギーを集め、熱媒体を介してタービンを回し発電する方法である。

太陽光発電に使用される太陽光パネルは、パネルの温度上昇に伴い、発電効率が低下する[1]。また、発電に用いられる太陽光の主な波長域は可視光から近赤外領域であり、近赤外線領域はパネル表面の温度上昇をもたらす。

そこで、太陽光パネル表面に太陽光スペクトルを制御可能な光学多層フィルムを貼付し、太陽光発電に不要な波長域を反射して太陽熱発電に利用することで太陽光発電の発電効率を低下させず、太陽光の利用効率の向上を目指した研究が行われている[2]。また、太陽熱発電では集熱部の単純化された熱損失モデル[3]やモンテカルロ法を用いた太陽熱発電タワーシステムの全体最適化[4]などの研究が行われているが、太陽光波長に依存した集熱部の温度場に関しては知見が少ない。ハイブリッド化の有効性を確認するためには、波長依存の輻射熱伝導解析が必要である。

本研究では太陽熱発電施設における反射鏡と集熱部の波長依存性を考慮した輻射熱伝導解析を行い集熱部の温度分布を解析する。解析にはCOMSOL Multiphysics®を用いる。既存のタワー集光型太陽熱発電施設をモデル化し、太陽光をヘリオスタットにより反射しタワー集熱部に集光した場合の集熱部の温度分布を、光線追跡と輻射熱伝導解析により求めた結果について考察する。

## 2. 太陽熱発電の概要

### (1) タワー集光型太陽熱発電

タワー集光型太陽熱発電は、太陽光を多数の反射鏡により反射し集光することでエネルギー密度を高め、集熱部で光エネルギーから熱エネルギーに変換する。水や熔融塩などの熱媒体によって機械エネルギーに変換することにより発電する。本研究では、太陽光発電と太陽熱発電のハイブリッド化において、ヘリオスタットに光学多層フィルムを貼付した太陽電池パネルを利用することを想定する。この光学多層フィルムは太陽光発電用の波長域を透過し、太陽熱発電用の波長域を反射する分光特性を有する[2]。

タワー集光型太陽熱発電は図-1に示すようにタワーの周りに配置した多数のヘリオスタットによって反射した太陽光をタワー上部の集熱部に集め、熱エネルギーに変換する。ヘリオスタットは仰角および方位角を制御することで太陽を追尾しながら太陽光を集熱部へ反射する。

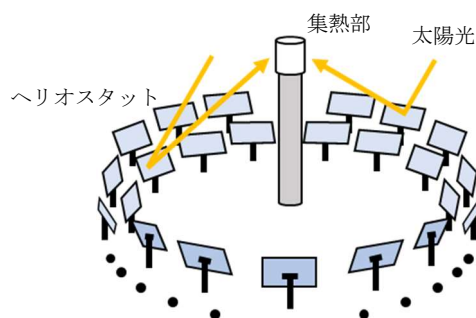


図-1 タワー集光型太陽熱発電施設の概要

(2) 太陽光発電と太陽熱発電のハイブリッド化

太陽光発電に用いられる太陽電池モジュールは温度上昇によって発電効率が低下するため、太陽光発電に寄与する波長以外の波長域を太陽電池モジュール表面に貼付した多層フィルムによって反射することで温度上昇を防ぎ、発電効率の低下を抑える。

図-2 に太陽光発電とタワー集光型太陽熱発電のハイブリッド化のための波長分離を行う光学多層フィルムの貼付位置を示す。太陽光はカバーガラスを透過し光学多層フィルムにより反射光および透過光に分離されて、タワー上部の集熱部と太陽電池モジュールへ向かう。

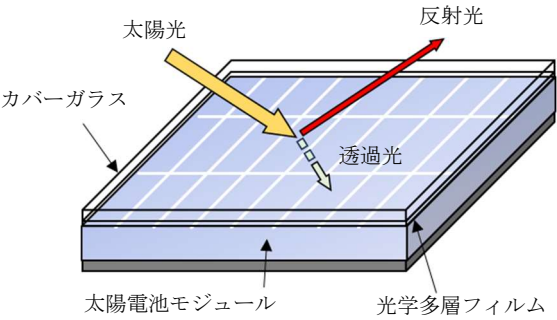


図-2 太陽光発電と太陽熱発電のハイブリッド化用光学多層フィルム

(3) 解析モデル

コストの観点から量産が可能な平板の太陽電池パネルを利用する。本研究では、スペイン、セビーリャに存在する Planta Solar 10(PS10)[3]の緒元を参考にモデルを作成した。このタワー集光型太陽熱発電施設の集熱部は内部に熱媒体である水蒸気を通る直径 200 mm のパイプを有する。本研究では、集光状態と温度分布を確認するため、集熱部を 36.0 m × 36.0 m、厚さ 200 mm の平面と仮定して広範囲に設定した。

また、ヘリオスタットは 12.84 m × 9.45 m の長方形平面とし、太陽軌道に応じて集熱部に集光するように方位角、仰角を制御する。本研究では、光学多層フィルムによる影響を調べるために配置数を 9 枚として解析を行う。配置図と位置関係を図-3 と表-1 に示す。

解析モデルの要素分割を図-4 と図-5 に示す。四面体要素により分割し、集熱部を 50368 要素、ヘリオスタットを 15670 要素に一樣分割した。

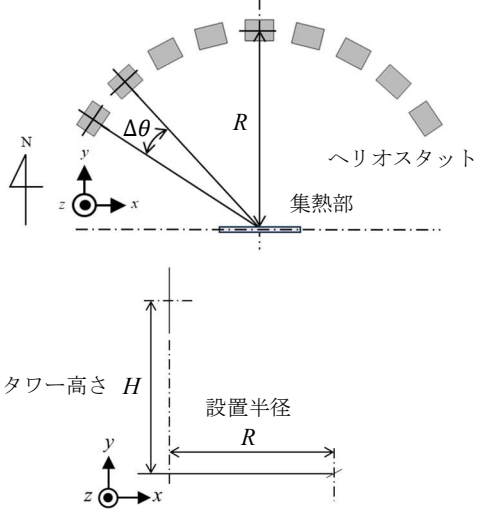


図-3 集熱部とヘリオスタットの配置図

表-1 ヘリオスタットの配置位置とタワー高さ

ヘリオスタットの配置数 [-]	9
半径 $R$ [m]	90.0
間隔 $\Delta\theta$ [deg]	14.0
タワー高さ $H$ [m]	94.5

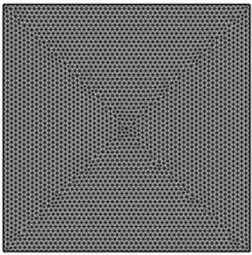


図-4 集熱部の要素分割

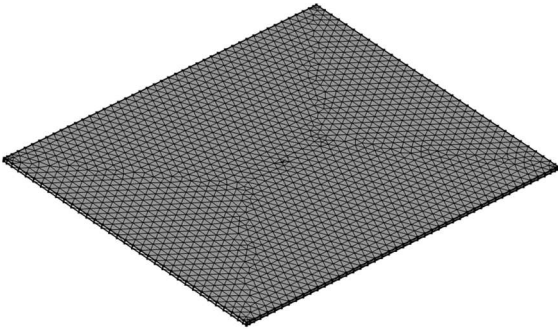


図-5ヘリオスタットの要素分割

3. 集熱部における輻射熱伝導解析

(1) 波長依存性

a) 太陽光スペクトル

物体表面においては電磁波の反射、透過、吸収が起こる。入射光のエネルギーに対するそれらの割合は物質、表面形状などによって異なり、電磁波の波長に依存する。本研究で用いる光学多層フィルムは分光反射強度を有するため、波長に応じた反射率、吸収率を考慮する必要がある。本研究では太陽光の各波長が持つエネルギー密度を示した分光放射度および分光放射度を用いた波長依存性を再現する。分光放射度すなわち波長とエネルギー密度の関係を図-6 に示す[5]。図-6 のように一定の帯域幅の区分波長域に分割し、各区分の面積を求めることでその波長域がもつ放射照度を算出する。

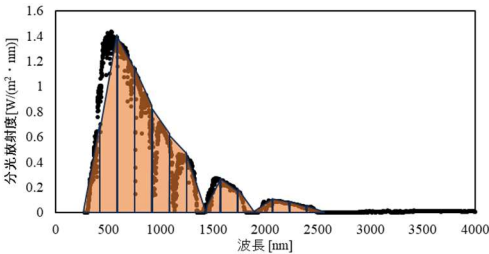


図-6 分光放射強度と波長の区分

b) ヘリオスタットの反射鏡に対する反射率

本研究ではヘリオスタットの反射鏡表面の波長依存の反射率を仮定した。反射鏡における分光反射率[6]を図-7 に示す。

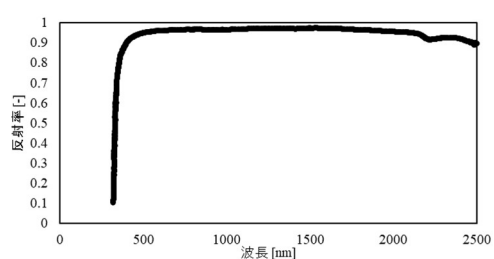


図-7 反射鏡表面の分光反射率

c) 集熱部の吸収率

集熱部の分光吸収率[7]を図-8に示す。また、集熱部には黒色塗料 Promark 2500 を塗布した Inconel 625 を用いると仮定した。

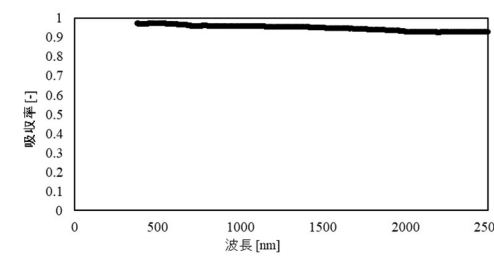


図-8 集熱部の分光吸収率

d) 日射量

時刻や日付、緯度によって太陽位置は変化する。そのため、地上への太陽光の入射角が変化することで地上に到達するエネルギー密度が変化し分光放射度の積分値、つまり日射量に変化する。

この日射量を見積るために、観測地点における日時ごとの日射量データ[8]を図-6で示した分光放射度のデータにおいて積分値がその日時における日射量と一致するように調整することで観測地点のある波長域における日射量を再現した。本研究ではPS10が存在するスペイン、セビーリャにおける2019年6月21日の日射量データを使用する。図-9に使用する日射量データを示す。

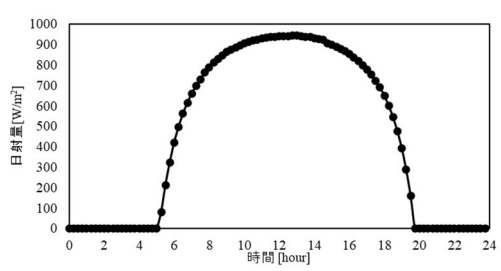


図-9 2019年6月21日の日射量 (Seville, Spain)

(2) 解析理論

a) 光線追跡

ヘリオスタットからの反射光線を求め、集熱部への照射を求める。式(1)と式(2)に示す式によって光線軌道を得る。

$$\frac{dq}{dt} = \frac{\partial \omega}{\partial \mathbf{k}}$$

(1)

$$\frac{d\mathbf{k}}{dt} = -\frac{\partial \omega}{\partial \mathbf{q}}$$

(2)

ここで、 $\mathbf{q}$ は光線位置、 $\omega$ は角周波数、 $\mathbf{k}$ は波動ベクトルを示す。

また、式(3)に示すスネルの法則に基づいてヘリオスタットにおける反射光線を求める。

$$n_1(\lambda) \sin \theta_1 = n_2(\lambda) \sin \theta_2$$

(3)

ここで、 $n_1$ と $n_2$ は屈折率、 $\lambda$ は波長、 $\theta_1$ は入射角、 $\theta_2$ は反射角を示す。

b) 輻射熱伝導解析

式(4)に示す支配方程式を有限要素法により解き、集熱部における温度変化を評価する。

$$[\mathbf{K}]\{\Phi\} + [\mathbf{C}]\left\{\frac{\partial \Phi}{\partial t}\right\} = \{\mathbf{F}\}$$

(4)

ここで、 $\{\Phi\}$ は全体の節点温度ベクトル、 $[\mathbf{K}]$ は熱伝導マトリクス、 $[\mathbf{C}]$ は熱容量マトリクス、 $\{\mathbf{F}\}$ は熱流束ベクトルを示す。

(3) 解析条件

表-2に光線追跡における解析条件、表-3に輻射熱伝導解析の解析条件を示す。

表-2 光線追跡の解析条件	
観測地点	Seville, Spain
緯度、経度	37.442 N, 6.25 W
日付	2019/6/21
解析時間	8:00 ~ 16:00
時間の刻み [min]	15
光線本数 [-]	300,000

表-3 輻射熱伝導解析の解析条件	
解析時間	8:00 ~ 16:00
時間の刻み [min]	15
集熱部の初期温度 [K]	293.15
外気の初期温度 [K]	293.15
輻射率 [-]	0.9
熱伝達係数 [W/(m <sup>2</sup> ・K)]	10

光線追跡では反射面にスネルの法則を適用する。輻射熱伝導解析では集熱部の集熱面に流入熱流束、集熱面、側面、裏面に輻射熱流束と対流熱流束を与える。

(4) 解析結果

ここまでに示した解析条件を用いて、(a) 吸収率、反射率の波長依存性を考慮しない場合、(b) ヘリオスタットに銀鏡が搭載されている場合、(c) ヘリオスタットに光学多層フィルムを貼付した太陽電池パネルを搭載した場合の解析を行った。光学多層フィルムは図-10に示すような反射率をもつものを用いる。また、温度変化を評価するために図-11のように測定点を設定し解析を行った。測定点の位置座標を(x,y)を表-4に示す。

図-12に16時における温度の比較、図-13に観測点におけるそれぞれの温度変化を示す。



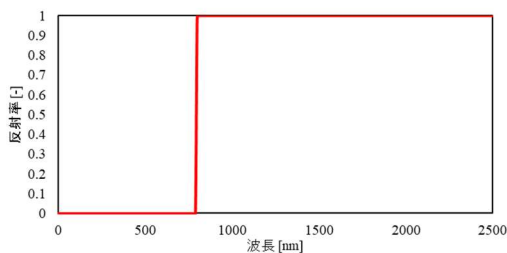


図-10 光学多層フィルムの反射率

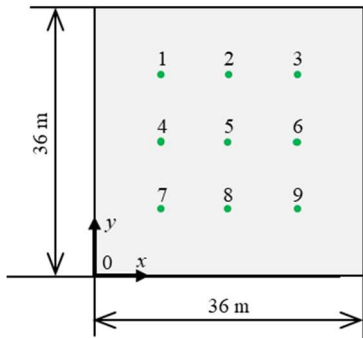


図-11 観測点

表-4 測定点の位置

測定点 No.	x [m]	y [m]
1	9.0	27.0
2	18.0	27.0
3	27.0	27.0
4	9.0	18.0
5	18.0	18.0
6	27.0	18.0
7	9.0	9.0
8	18.0	9.0
9	27.0	9.0

解析結果からヘリオスタットの反射面における損失エネルギー、集熱部で吸収されなかったエネルギーによって集熱部の温度に差が生じていることが分かる。また、ヘリオスタットに銀鏡を搭載した場合と光学多層フィルムを搭載した場合では後者の集熱部温度が低い結果が得られた。以上から、吸収率、反射率の波長依存性、光学多層フィルムを貼付した場合による分光特性を考慮した輻射熱伝導解析の有効性を確認した。

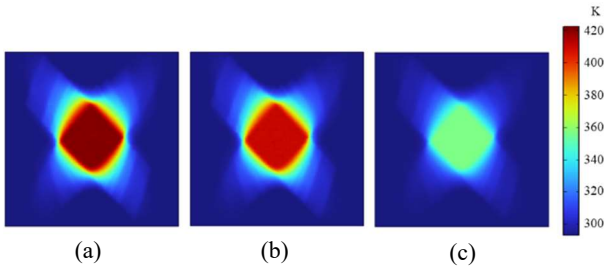


図-12 16時における温度分布

4. おわりに

本研究では太陽光発電と太陽熱発電のハイブリッド化に向けて波長依存性を考慮した集熱部における時間依存の温度変化を求めるための非定常輻射熱伝導解析を行った。その結果、反射鏡と集熱部表面の吸収率、反射率に対するエネルギーの損失、また、光学多層フィルムの分光特性により集熱部の温度分布への影響が認められた。

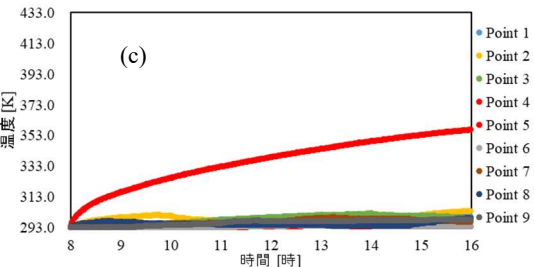
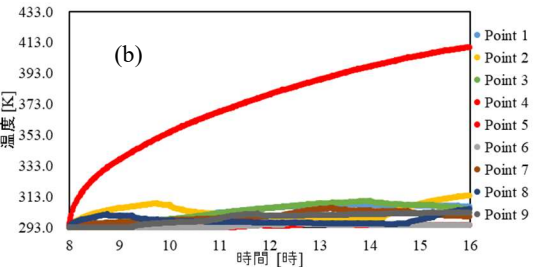
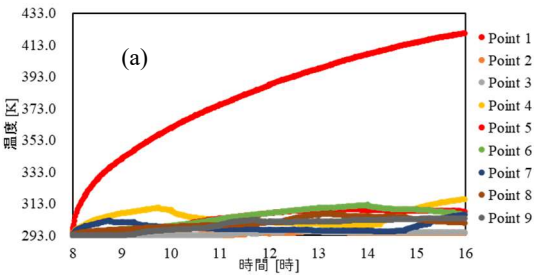


図-13 解析条件(a) (b) (c)における温度変化

謝 辞

本研究は JSPS 科研費 22K03875 の助成を受けたものである。

参考文献

[1] E.Skoplaki and J.A.Palyvos, On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations, Solar Energy, Vol.83, pp.614-624, 2009.

[2] 松本雄大, 中村正行: 受光量の解析に基づくタワー集光型太陽熱発電と太陽光発電の複合化における効率の評価, 日本機械学会第 29 回設計工学・システム部門講演論文集, Vol.29, 2019, DOI:10.1299/jsmeds.2019.29.3105.

[3] O.Farges. et al.: Global optimization of solar power tower systems using a Monte Carlo algorithm: Application to a redesign of the PS10 solar thermal power plant, Renewable Energy, Vol. 119, pp. 345-353, 2018.

[4] Eka, R., Betts and T.R., Gottschalg R.: Spectral irradiance effects on the outdoor performance of photovoltaic modules, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol.69, pp.429-434, 2017.

[5] NREL, Reference Air Mass 1.5 Spectra, <<https://www.nrel.gov/grid/solar-resource/spectra-am1.5.html>>, (参照日 2024/4/5).

[6] Florian, Sutter. et al.: The effect of incidence angle on the reflectance of solar mirrors, Solar Energy Materials and Solar Cells, vol.176, pp. 119-133, 2018.

[7] Jing, Nie. et al, Xiao.: Aging characteristic of solar coating and their cost-effectiveness, Solar Energy, Vol. 248, pp. 183-195, 2022.

[8] NREL, NSRDB: National Solar Radiation Database, <<https://nsrdb.nrel.gov/data-viewer>>, (参照日 2024/4/5).