

真空集熱管を用いた建物透過日射熱負荷削減対策の検討

—太陽追尾機構の集光効率—

REDUCTION OF TRANSMITTED SOLAR GAIN USING EVACUATED TUBULAR COLLECTORS ON BUILDING FACADE —LIGHT COLLECTION EFFICIENCY OF SOLAR TRACKING MECHANISM—

地域環境計画分野 高津竜斗

Field of Regional Environmental Planning Ryuto Kozu

建物ガラス壁面を透過する日射は冷房負荷増大の一因となるため、遮熱技術が求められる。本研究はダブルスキンファサードに集光・集熱機構を設けることで、顕熱放散を低減する技術を検討する。簡易な太陽追尾方法としてレンズスライド追尾方式について検討する。リニアフレネルレンズ斜め入射における集光を明らかにし、得られた特性を、LCEM ツールに反映し、試算を行う。試算の結果、簡易方式である Case2 でも晴天日に窓面到達日射の 40.7 [%] を集熱できることがわかった。

Since transparent solar radiation contributes to the cooling load increases, the thermal barrier technology is required. In this study, we investigated the mechanism for reducing the sensible heat dissipation by providing condensed and heat collection apparatus into a double skin in the facade. We consider the lens slide tracking system as a simple solar tracking method. It revealed condensing in the linear Fresnel lens oblique solar radiation, and the resulting reflected in LCEM tool, performs calculations. Result of estimation, direct solar radiation reaching windows of 40.7[%] in Case2 is a simplified method in sunny day.

1. 研究の背景・目的

1.1. 研究の背景

近年、外壁ガラス張りの建物が増加しているが、夏季には透過日射が熱負荷となり、建物の冷房負荷を増大させる原因となるため、外壁ガラス張りの建物ではダブルスキン構造(図 1)による遮熱・排熱技術が用いられている。ダブルスキン構造は 2 枚のガラスの間に遮蔽物となるブラインドを設けて日射を遮蔽し、熱を空気に転換して排出することで遮熱を行う機構である。武政ら^[1]の研究によると、ダブルスキン機構によって窓面入射日射量の 60%~70% が排熱可能である。

これに対して、既往研究^[2]において、太陽熱集熱器に用いられる真空集熱管を、ダブルスキン部に集光機構と共に設置することで、太陽熱の遮熱と同時に集熱を行う機構を考案した(図 2)。この技術は採光を確保しながら遮熱を行えるため、窓面への導入が期待される。以下、この機構を遮熱・集熱機構と呼ぶ。

1.2. 研究の目的

既往研究として、リニアフレネルレンズと真空集熱管を用いて太陽を手動追尾し、集光・集熱する実験を行っている。また、横田ら^[3]はリニアフレネルレンズ

に対して法線方向から入射による集光分布を把握する実験を行った。実験より得られたパラメータから太陽熱利用効果試算を行っている。遮熱・集熱機構が太陽を完全に追尾する方式での検討が行われている。よって、本研究ではより簡易な太陽追尾方法としてレンズスライド追尾方式について検討する。レンズスライド追尾方式を考えるにあたり、リニアフレネルレンズ斜め入射における集光を明らかにする。得られたレンズスライド追尾における集光の特性を試算に反映し、集

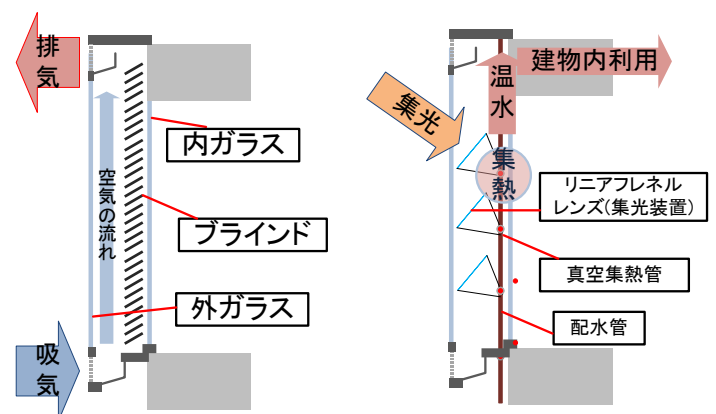


図 1 ダブルスキン構造

図 2 遮熱・集熱機構

熱量の試算を行う。また、遮熱・集熱機構で得られる太陽熱の利用として、冷暖房空調への利用が考えられる。本研究では、夏季冷房利用時と冬季暖房利用時それぞれについて効果試算を行う。

2. リニアフレネルレンズ斜め日射集光実験

遮熱・集熱機構では、真空集熱管に対して線状の集光を行う。線状集光の分布特性把握を目的に小型実験装置を用いて実験を行う。

2.1. リニアフレネルレンズ

フレネルレンズとは、プリズム形状の複数枚のレンズを組み合わせて1枚のレンズと同じ性能を出せるようにしたものである(図3)。中でもリニアフレネルレンズは垂直入射した光を一方方向だけに集光するもので、直線状の焦点パターンを持つ(図4)。

2.2. 実験場所

実験は2015年9月～10月の晴天日に、大阪市立大学C棟屋上にて行った。

2.3. 実験装置

実験装置の平面図及び側面図を図5に示す。XYZ軸の定義は図5上の矢印方向を正とする。設計上の焦点位置を原点とする。図5中の数字は表1に示す構成物を表す。日射センサー②③⑤は同一のものである。

実験装置は赤道儀に設置して実験を行う。①太陽方向把握器具により装置を太陽に正対させる。②日射センサーは遮光筒内にあり、直達日射量を測定する。③日射センサーは全天日射量を測定する。④設置台上にリニアフレネルレンズ(150×150 [mm])、焦点距離150 [mm]及びXYZステージを設置する。⑤日射センサーは集光された日射量を測定する。焦点付近を中心にXYZステージで左右に移動させ、集光分布を把握する。⑥回転ステージはレンズと日射センサーを同時に回転させる。下層は回転しないので、②と③の日射センサーは太陽方向に正対させたまま、任意の角度でのレンズへの太陽光の入射が可能である。

2.4. 斜め入射時の集光分布の把握

レンズを透過した集光日射量が日射センサーの測定範囲内に収まるように日射を減衰させる。日射減衰板として黒色減光板を用いた。日射透過率は15.15 [%](実験値)である。

2.4.1. 集光倍率

集光日射量を透過率で除して得る減衰前の日射量と直達日射量の比を集光倍率として扱う(数式1)。

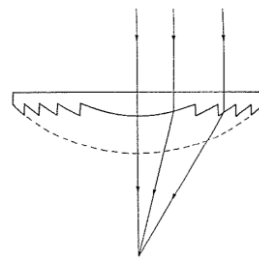


図3 フレネルレンズ
断面

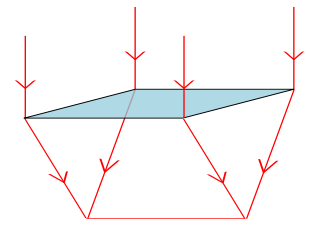


図4 リニアフレネル
レンズの集光

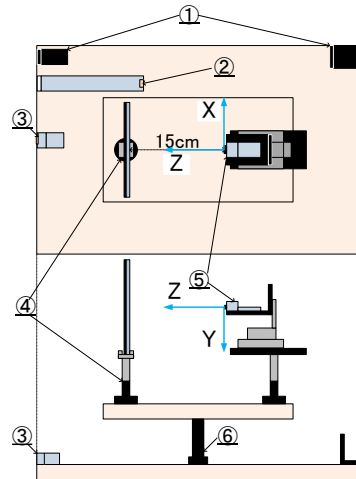


図5 実験装置

(上：平面図、下：側面図)

表1 実験装置構成物

名称
①太陽方向把握器具
②日射センサー
③日射センサー
④設置台
⑤日射センサー
⑥回転ステージ

$$\rho = \frac{IC/F}{ID} \quad \text{数式 1}$$

ρ : 集光倍率 [-], IC : 集光日射量 [W/m^2], ID : 直達日射量 [W/m^2],
 F : 透過率 [-]

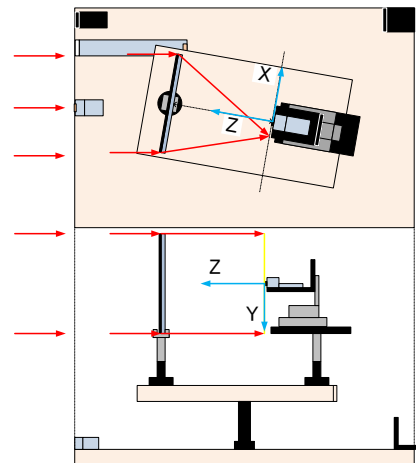


図6 斜め入射時の集光位置

表2 斜め入射時の集光位置までの距離

レンズ回転角度	10°	20°	30°
光軸から焦点までの距離 [mm]	26.4	54.6	86.6

2.4.2. 集光位置の変化

実験は Y 軸上に集光線を発生させて行う。Y 軸上に集光線が発生するので、入射角度が発生すると集光位置が図 6 の矢印が示すように変化する。集光位置の変化の予想位置を表 2 に示す。

2.4.3. レンズ範囲外日射の測定

傾斜角が大きい場合、レンズの範囲外に集光位置が発生する。そのため、レンズ外からの日射も集光位置にて計測されることになる。レンズ外の日射を実験結果から差し引くために、本実験とは別にレンズ外日射 $((1-f)IS + ID_n)$ の測定を行う必要がある。日射量の式を数式 2、数式 3 に示す。レンズ部分に遮蔽板を設置し、レンズ部分からの日射がない条件で測定を行う。同様の日射条件下とするために、全天日射量が同じような条件で除する日射を測定する。

2.4.4. 実験方法

集光線が Y 軸上に発生するようにレンズを装置に設置し、レンズに日射減衰板を設置する。装置を太陽に正対させ、回転ステージを用いて上層を回転させ、任意の入射角度を設定する。日射量変動が小さい条件で各測定点約 60 秒間集光日射量を測定し、平均値を用いて結果を分析する。X 軸上で日射センサーをスライドさせていき、5mm 間隔で X 軸上 ± 30 [mm] の範囲で測定を行う。これらの実験を入射角度 $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ の各角度にて行い、集光分布形状を把握する。

2.4.5. 実験結果

計測された集光倍率を傾斜角度毎にまとめたものを図 7 に示す。入射角度が大きくなると集光のピーク値が減少する。集光分布の形状は 0° の法線方向からの入射ではおよそ左右対称の形となっている。しかし、入射角度が大きくなると、X 座標正の側では 0° と同じ形となっているが、負の側では緩やかなカーブを描くような分布形状となっている。

原因として、フレネルレンズの特性が考えられる。『負の屈折率層を有する非結像フレネルレンズの光学解析』^[4]によるとフレネルレンズは設計上許容入射角度があり、それを超える入射角度では集光効率が落ちるとある。また、許容入射角度内でもフレネルレンズ内の反射による損失などにより、100%の集光が行われないとある。レンズの集光特性から入射角度が大きくなると、負の側で緩やかな集光分布になっていると考えられる。

$$IG = \tau(ID_n \cdot r_c + fIS + (1-f)IS + ID_n) \quad \text{数式 2}$$

$$IC = \tau(ID_n \cdot r_c + fIS) \quad \text{数式 3}$$

IG : 測定点日射量 [W/m²]

ID_n : 正味直達日射量 [W/m²]

IS : 天空日射量 [W/m²]、IC : 集光日射量 [W/m²]

r_c : 集光倍率、τ : 透過率、f : 形態係数

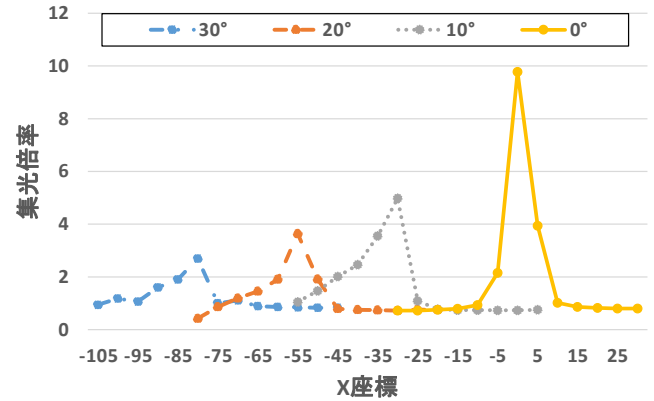


図 7 入射角度毎の集光倍率まとめ

表 3 ピーク位置とピーク集光倍率

入射角度	0°	10°	20°	30°
ピーク位置	0	-30	-55	-80
ピーク集光倍率	9.8	5	3.6	2.7

2.5. 集光分布式の作成

実験によって得られた集光分布のデータを元に、日射量・集光位置・入射角度から集光日射量を計算する式を作成する。

2.5.1. Phong モデル式

BRDF モデルにおいて用いられる修正 Phong モデル^[5]を示す(数式 4)。数式 4 中の、拡散反射率 k_d 、鏡面反射率 k_s 、Phong のパラメータ n の 3 つにより、各試料の反射特性は決まる。この 3 つを変数とし、扱う式である。この修正 Phong モデルを元に集光分布を求める式を作成する。

$$\rho = k_d \frac{1}{\pi} + k_s \frac{n+2}{2\pi} \cos^n \alpha \quad \text{数式 4}$$

k_d : 拡散反射率、 k_s : 鏡面反射率

n : Phong のパラメータ

α : 正反射方向と反射方向の成す角

2.5.2. 実験結果を元にした式作成

修正 Phong モデルを元に、実験結果から集光分布を表す式を作成する。 k_{at} k_{st} n m の 4 つを変数として式を作成する(数式 5)。

実験値から求めた集光分布式を数式 5 に示す。入射

角度が大きくなると、集光のピーク位置も変化する。幅 X [mm]のレンズにおいて、入射角度 θ [deg]で入射が起こると、ピーク位置は $X \tan \theta$ [mm]だけ負の方向に変化する。数式 5 から得られるグラフを図 8 に示す。実験値と同様の分布形状が得られた。

$$\rho = k_{dt} \frac{1}{\pi} + k_{st} \frac{n+2}{2\pi} \cos^n(A \cdot m) \quad \text{数式 5}$$

$$k_{dt} = 2.8$$

$$k_{st} = \left((-5.434 \log(\theta + 1) + 11.33) - 2.8 \frac{1}{\pi} \right) \frac{n+2}{2\pi}$$

$$n = 200$$

$$m = 1 \quad (A \geq (0 - X \tan \theta))$$

$$m = (-0.252 \log(\theta + 1) + 1) \quad (A < (0 - X \tan \theta))$$

$$A = 150 \tan \alpha + 150 \tan \theta$$

ρ : 集光倍率、 θ : 入射角度 [deg]

A : 集光位置、 X : レンズ幅 [mm]

α : レンズ中心から集光位置に対しての角度 [deg]

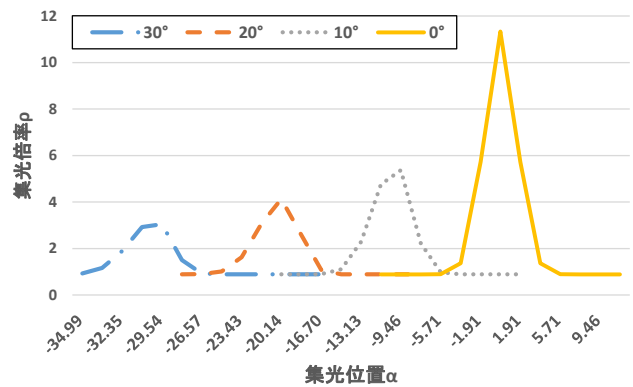


図 8 集光分布式から導かれるグラフ

3. 集光・集熱量試算

遮熱・集熱機構が集熱する量についての試算を行う。また、集熱して得られる温水を利用した太陽熱利用空調について試算を行う。シミュレーションは国土交通省が公開している LCEM ツール^[6]を用いる。

3.1. システムの概要

LCEM ツール上の太陽熱利用デシカント空調システムの概要を示す。本研究で考慮する遮熱・集熱機構を用いた太陽熱利用にあたる部分を図 9 に、冷房運転時の太陽熱利用デシカント空調システムを図 10 に、暖房運転時の太陽熱利用デシカント空調システムを図 11 に示す。冷房運転時は横田^[3]と同様の条件である。

遮熱・集熱機構を用いた太陽熱利用は集熱器、蓄熱槽およびポンプからなる。蓄熱槽は集熱器へ送る水を蓄え、集熱器が集熱した熱を温水として蓄える役割がある。温水は熱源ポンプによってデシカント空調機に送水される。ここで遮熱・集熱機構の集熱量を試算する。

太陽熱利用デシカント空調システムについて述べる。集熱器で得られる熱量だけで除湿に要する熱量を確保できない場合に対応するために補助熱源を導入する。図中の空気熱源 HP がそれにあたる。この HP は蓄熱槽から贈られる温水温度が除湿ロータの再生温度に満たない場合に運転させる。

デシカント空調機は冷房運転時には取り入れた外気を除湿・冷却し、室に送る。また、室からの戻り空気を、再生コイルを通して温風とし、除湿ロータの再生を行う。対して暖房運転時には取り入れた外気を加湿・加熱し、室に送る。また、室からの戻り空気を、再生コイルを通して冷風とし、ロータの再生を行う。冷房時と暖房時それぞれで必要となる消費電力量を試算する。

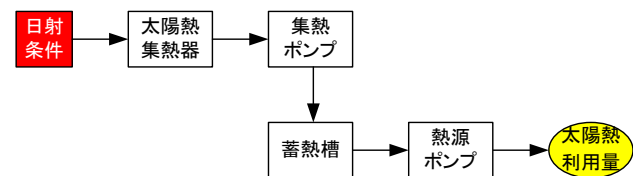


図 9 遮熱・集熱機構を用いた太陽熱利用

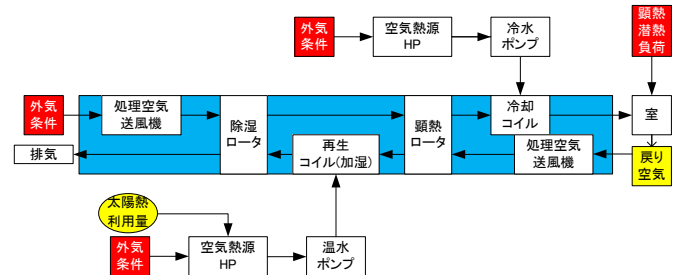


図 10 太陽熱利用デシカント空調システム (冷房運転時)

3.2. 計算対象室の設定

対象室は幅 33.6 [m]、奥行き 24.6 [m]、床面積 826.6 [m²]であり、階高 3.6 [m]・天井高 2.6 [m]のオフィスとした。必要外気量を単位面積当たり 5 [m³/(m²h)]とすれば、1 時間当たりの導入外気量は 4132.8 [m³/h]となる。

また、遮熱・集熱機構は窓面および壁面に設置すると想定し、集光面積・集熱面積は南壁面幅と階高から求める 120.9 [m²]とする。

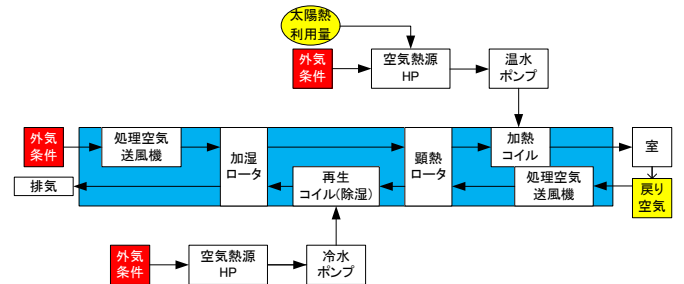


図 11 太陽熱利用デシカント空調システム (暖房運転時)

表 4 試算条件

条件	太陽エネルギー利用形態	外気処理	室負荷処理
Case1	リニアフレネルレンズ (完全追尾) +真空集熱管	デシカント 空調機	冷却除湿 空調機
Case2	リニアフレネルレンズ (レンズスライド追尾) +真空集熱管	デシカント 空調機	冷却除湿 空調機

表 5 集熱管集光可能日射まとめ

入射角度	0	5	10	15	20	25	30
集光倍率	0.715	0.504	0.415	0.355	0.309	0.271	0.239

3.3. 試算条件

遮熱機構による太陽熱利用空調の効果試算に当たり、表 4 の条件を設定する。

Case1 は太陽高度の変化に対して、常に入射角 0°となるようにリニアフレネルレンズで太陽を完全追尾する条件である。つまり理想的な集光・集熱が行われる条件である。Case2 は太陽高度変化に対してレンズを平行移動させる条件である。この際の平行移動とは、レンズ斜め入射時の焦点位置に集熱管が設置されるようにレンズを移動させることを示す。Case2 は Case1 に比べて追尾精度が劣るため得られる熱量は小さくなるが、より現実的な条件である。レンズ平行移動の条件のため、レンズに対して斜めに日射が入射する条件であり、この条件に実験で求めた集光分布を用いる。

3.4. 試算の諸条件

その他の入力条件について述べる。

(1) 気象データ

試算時の温湿度や日射量の入力条件として、拡張アメダス気象データ 1981-2000^[7]の標準年データを用いる。試算地点は東京（北緯 35.69°、東経 139.76°）、夏季冷房期間を 6/1~9/30、冬季暖房期間を 11/1~2/28 とする。

(2) 室利用時間

対象室であるオフィスは毎日 9~18 時に利用されているとして、外気のエンタルピが室設定よりも高い場合に冷暖房運転を行う。

(3) 集熱器設置傾斜角・設置方位

南中時の太陽高度の年間の平均は 43°である。これより、遮熱・集熱機構において南中時にリニアフレネルレンズが日射を法線方向から受けるようにするため、リニアフレネルレンズを 47°の傾斜角で設置することを想定する。

また、遮熱機構を建物壁面に設置する場合、南壁面で年間を通じて最大の日射受熱量となる。そのため、南壁面での設置を想定する。

(4) 集熱面積

集熱量の試算においては、単位面積当たりの集熱量を見るために集熱面積を 1[m²]で試算を行う。

冷房期間・暖房期間を通じての試算では、集熱面積を 120.9 [m²]とする。

(5) 集熱管集光可能日射量

エラー! 参照元が見つかりません。のうち、真空集熱管が集光できる範囲は $\alpha = \pm 2.69$ [deg] である。この範囲の積分値を集熱管が集光できる日射量として扱う。表 5 にその値を整理する。

3.5. 試算結果

3.5.1. 集熱量

2 条件の集熱量比較を図 12 に示す。Case1,2 は直達日射のみを集光・集熱の対象とした条件である。積算値で比較すると、Case1 の 1 日の集熱量積算値 645.4 [W/m²]に対して、Case2 では 459.7 [W/m²]となっており、Case1 に対して Case2 は 71.2 [%]程度の集熱量である。また、Case2 における集熱量とレンズ面に到達した日射量を図 13 に示す。レンズで集光される直達日射量のうち、40.7 [%]が集熱に利用される。Case1 においては 47.0 [%]であり、その差は 6.3 [point]である。遮熱・集熱機構では窓面到達日射量の 40 [%]程度が処理される。既存のダブルスキン構造によって、窓面到達日射量の 60 [%]が顕熱として放散されていたことと比較すると、遮熱・集熱機構による大気放熱低減効果があるといえる。真空集熱管が受ける日射量を直接計算している点が横田^[3]の研究との相違点であり、より厳密な計算になっているといえる。

3.5.2. 冷房期間・暖房期間の積算消費電力量

冷房期間(6/1~9/28)及び暖房期間(11/1~2/28)の双方 120 日間についての積算消費電力について検討する。図 14 に冷房期間の積算消費電力、図 15 に暖房期間の積算消費電力を示す。Case0 は集熱を行わない太陽熱利用量がない条件である。

冷房期間中の積算消費電力では、Case1 と Case2 共に Case0 より消費電力量が小さい。Case1 と Case2 の積算消費電力量に大きく差が生じておらず、完全追尾方式に対してスライド追尾方式でも同程度の消費電力量の削減が見込めるといえる。暖房期間中の積算消費電力では、Case0 に対して非常に消費電力量が小さい。また、Case1 に対して Case2 は 16.2 [%]程度大きい。この消費電力量の差は温水ポンプへ繋がる空気熱源 HP によるものであると考えられ、空気熱源 HP が生成する必要のあるエネルギーを太陽熱集熱によって賄うことが消費電力量に大きく影響していると考えられる。

4. まとめ

- リニアフレネルレンズ斜め日射集光実験を行い、集光分布を把握した。また、日射量・集光位置・入射角度を与えることで集光量を算出する式を作成した。
- 完全追尾方式に対して、スライド追尾方式では集熱量が7割程度になることが試算からわかった。完全追尾方式は性能的にオーバースペックであると考えられており、より簡易な方式としてスライド追尾方式がある。
- 晴天時において、Case2の集熱量はレンズ到達日射量の40.7 [%]程度であり、簡易な追尾方であるスライド追尾でも遮熱・集熱機構による日射熱の処理効果があると確認できた。
- 冷房期間・暖房期間を通じた積算消費電力量を試算した。結果から、冷房期間ではCase1とCase2に大きく差は発生しないが、暖房期間では16.2 [%]の差が発生する。暖房運転時には集熱器で得られる集熱量が大きく消費電力量に影響するといことがいえる。

5. 今後の課題

- 集光実験において、日射減衰板が透過した日射に影響を与えている可能性があった。日射減衰板の影響についての把握を厳密に行うべきである。
- 完全追尾方式とスライド追尾方式についての比較として、追尾にかかるエネルギーについては未検討である。完全追尾方式はスライド追尾方式よりも緻密な追尾を行う必要があるため、稼働により多くのエネルギーがかかると考えられ、その点について検討を行うべきである。

<参考文献>

- [1] 武政祐一、ダブルスキンファサードの熱性能に関する研究：第1報-夏期・冬期実測による性能評価、空気調和・衛生工学会論文集、103(2005)
- [2] 高津竜斗、真空集熱管を用いた建物透過日射熱負荷削減対策の検討—小型実験装置を用いた熱収支の実験—、大阪市立大学工学部都市学科卒業論文、(2013)
- [3] 横田友和、真空集熱管を用いた建物透過日射熱負荷削減対策の検討—外皮の熱収支と太陽熱利用空調の効果—、大阪市立大学大学院工学研究科都市系専攻修士論文、(2015)
- [4] 山田昇・岡本和也、負の屈折率層を有する非結像フレネルレンズの光学解析、日本太陽エネルギー学会、太陽エネルギーp.41-47
- [5] 奥田彩奈、大阪市立大学工学部都市学科卒業論文、(2012)
- [6] 官庁営繕：ライフサイクルエネルギーマネジメント(LCEM) - 国土交通省
URL:http://www.mlit.go.jp/gobuild/sesaku_lcem_lcem.html
- [7] 日本建築学会、拡張アメダス気象データ 1981-2000 Expanded AMeDAS Weather Data、(2005)

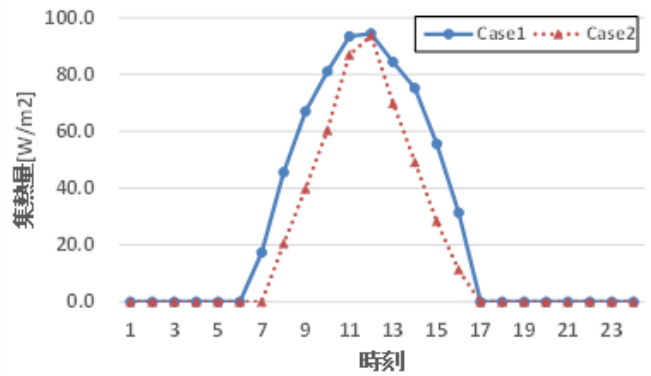


図 12 Case1・Case2 集熱量比較(8/10)

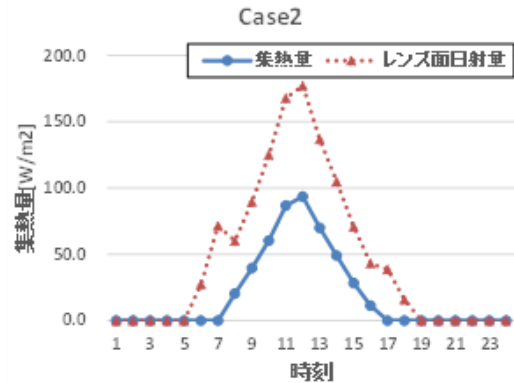


図 13 集熱量とレンズ面到達日射量比較

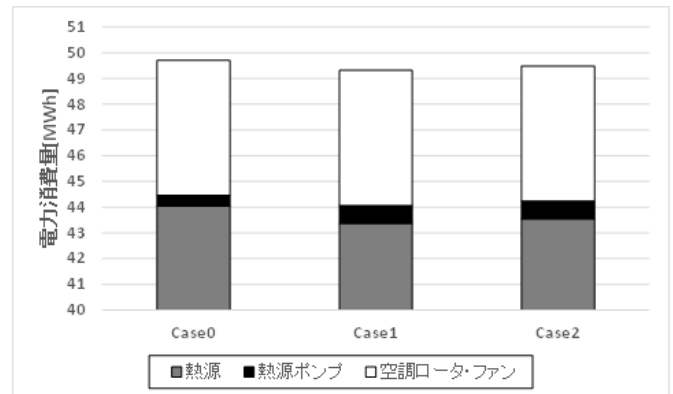


図 14 冷房期間の積算消費電力量

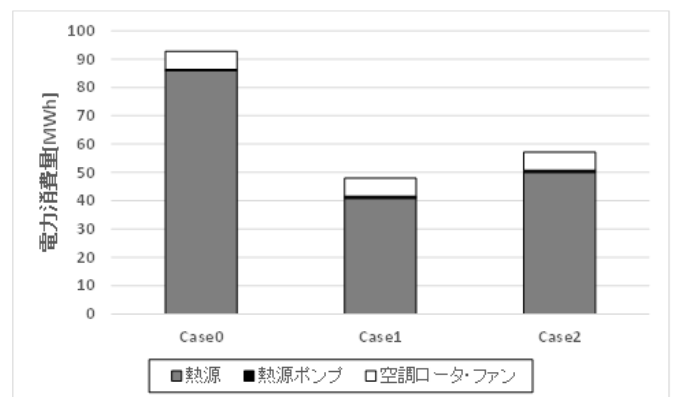


図 15 暖房期間の積算消費電力量

- 1 集光倍率の式におけるグラフにおいて、実験とモデルで負の側の形状が違うように見えるが、それはなぜか。

作成したグラフ上でも同様の形状となっていると判断していたが、少々見難い形となっていたため、グラフを修正した。

- 2 近似式の作成上、左右非対称を表せているか。

負の側のみを楕円に乗せていたので、正と負両方の近似式を表す形に式を修正した。

- 3 試算における集熱器設置傾斜角は太陽高度を元にしてしているとあるが、どのように取り決めたのか。

南中時の太陽高度の年間の平均が 43° であるので、これに対して南中時にリニアフレネルレンズが日射を法線方向から受けるようにする場合の設置傾斜角度は 47° である。日射量が一日で最大になると考えられる南中時に一番良い条件である法線方向からの日射を受けることを想定し、 47° の傾斜角で集熱器を設置することを想定した。

- 4 試算での Case1, Case2 の差は何か。損失はどこに行ったか。

損失は建物へ透過する熱となると考えられる。Case1 と Case2 の差はレンズの追尾条件の差であり、Case1 はより理想的な集光が行われる条件であると想定しているため、Case2 よりも集光・集熱量が大きくなる。