

# 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—

## REDUCTION OF TRANSMITTED SOLAR GAIN USING EVACUATED TUBULAR COLLECTORS ON BUILDING FACADE —HEAT BALANCE OF BUILDING SKIN AND EFFECTS OF SOLAR HEAT UTILIZATION FOR AIR CONDITIONING—

地域環境計画分野 横田友和

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。本研究ではダブルスキンファサードに集光・集熱装置を設けることで顕熱放散を低減する技術を検討する。リアフレネルレンズの集光実験の結果を踏まえ、LCEM ツールで太陽熱利用空調の効果を検討した。試算の結果、遮熱機構を導入した Case1 は晴天日に窓面到達日射の 40~50 [%]の集熱量が得られる。また Case1 は太陽熱利用しない Case4 に比べて冷房期間の消費電力が 2.3 [MWh]小さい。

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. Based on the results of the condensing experiment using linear Fresnel lens, it was studied the effect of solar heat utilization for air conditioning by LCEM tool. Result of estimation, direct solar radiation reaching windows of 40-50[%] in Case1 is heat collection amount in sunny day. Case1 using solar heat is 2.3 [MWh] accumulated energy is smaller than Case4 that isn't utilized.

### 1. 研究の背景・目的

#### 1.1 研究の背景

1980年以降、建物壁面材としてガラスは増加傾向にあるが<sup>[1]</sup>、夏季は透過日射が熱負荷となるためダブルスキンファサード等の遮熱技術が必要とされる。ダブルスキンは2枚のガラス間に設けたブラインドで日射を遮蔽し、吸収熱が空気へ放散されるため高い遮熱性能が期待される。一方、夏季の窓面日射量に対して流出顕熱(換気+外部対流)は60 [%]程度となる<sup>[2]</sup>(図1)。

高津ら<sup>[3]</sup>は、ダブルスキン内に真空集熱管と日射集光装置を設けた機構により、室内透過日射熱負荷の低減と同時に、熱を水に移すことで大気への熱放散を低減する技術を提案した(図2)。この技術は採光を確保でき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

遮熱・集熱機構の検討として、高津ら<sup>[3]</sup>はリ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た条件で集光・集熱する実験を行っている。真空集熱管を遮熱用途に用いた研究は他になく、依然集光状況の詳細は明らかでない。よって本研究では、遮熱・集

熱機構の実用化に向け、レンズによる集光状況把握と太陽移動に伴う日射集光位置や日射集光倍率の変化について実験での検討を目的とする。

ところで遮熱・集熱機構で得られる太陽熱の空調利用では、暖房時の直接利用および冷房時の熱駆動型冷凍機の熱源利用が挙げられる。設備の稼働率を高めるには冬季・夏季を通じた太陽熱の利用が求められる、本研究では、遮熱機構で得られる太陽熱利用空調について夏季冷房利用時を対象とした効果試算を行う。

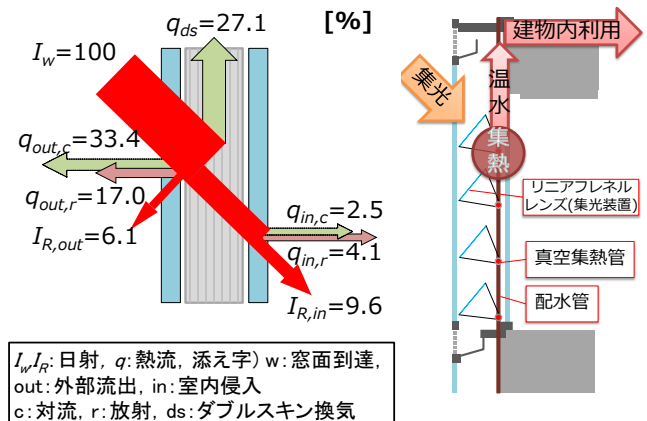


図1 夏季ダブルスキン熱収支<sup>[2]</sup> 図2 遮熱・集熱機構

## 2. リニアフレネルレンズ集光実験

遮熱機構の実用時には幅を持つ真空集熱管に対して線状の集光が有効だといえる。線状集光の分布特性把握を目的に小型レンズを用いた実験を行う

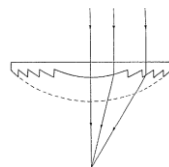


図3 フレネルレンズ断面

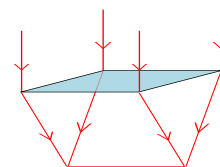


図4 リニアフレネルレンズの集光

### 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向に集光し、直線状の焦点パターン(焦線)を持つ(図4)。

### 2.2 実験概要

実験は2014年12月~2015年1月の晴天日に、大阪市立大学G棟屋上にて行った。

### 2.3 実験装置

集光実験装置の平面図および側面図を図5に示し、原点とXYZ座標を定義する。なお、設計上の焦点位置を原点と定める。図中の丸囲い数字は表1に示す構成物を意味する。日射センサー②③⑤は同一のもので受感径8[mm]を有する。

実験装置は赤道儀上に設置し、①の器具により図5左側を太陽に正対させる。②の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は全天日射量を測定する。④にリニアフレネルレンズ(150×150[mm]、焦点距離150[mm])を設置する。⑤は集光された日射量を測定するもので、焦点付近を中心にXYZステージで上下前後左右に移動できる(表2)。

### 2.4 集光日射分布の把握

レンズを通過した集光日射量が日射センサーの動作範囲内となるように日射を減衰する。日射減衰板として黒色樹脂製パンチング板を用いた。開孔は径2[mm]・ピッチ8[mm]が60°千鳥配置されており、開孔率5.7[%](メーカー値)である。

#### 2.4.1 天空日射量と正味の集光日射量

集光日射量測定値には天空日射量が含まれる。測定される集光日射量から天空日射量を差し引いた値を正味の集光日射量と定義する(式(1))。

#### 2.4.2 集光倍率

リニアフレネルレンズで主に集光されるのは光軸に平行な直達日射成分のみと仮定すれば、正味の集光日射量は法線面直達日射が増幅されたものである。よって、正味の集光日射量を日射減衰板の開孔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(式(2))。

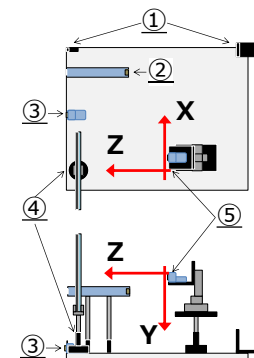


図5 実験装置  
(上:平面図,下:側面図)

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

表2 XYZステージ仕様

	移動量 [mm]	測定範囲 [mm]
X軸		0~50
Y軸	±30	0~50
Z軸		-30~+28

$$IC_{net} = IC_m - IS_m \quad \text{式(1)}$$

$$r_c = \frac{IC_{net}/F}{ID_N} \quad \text{式(2)}$$

IC: 集光日射量 [W/m<sup>2</sup>], IS: 天空日射量 [W/m<sup>2</sup>],  
r<sub>c</sub>: 集光倍率 [-], ID: 直達日射量 [W/m<sup>2</sup>], F: 開孔率 [-].  
添え字 net: 正味量, m: 測定点, N: 法線面



図6 集光日射量の測定

#### 2.4.3 実験方法

焦線がX軸上に生じるようにレンズを装置に設置し、その手前に日射減衰板を設置する(図6)。装置を太陽に正対させ、各測定点で60秒間日射量を測定し、平均値を用いて結果を分析する。

#### 2.4.4 実験結果

XYZ軸の集光日射分布について述べる。なお実験期間中の各測定点における日射環境はほぼ一様であることを確認している。図7にXYZ軸の集光倍率分布を示す

##### (1) X軸分布

焦線はX軸上に生じるため、集光倍率はほぼ一定となる。数値上下変動の原因はパンチング板により日射が遮蔽されるためと考えられる。遮蔽の影響を除けばX軸上の集光倍率は21.7[-]程度になる。

## (2) Y 軸分布

Y 軸は焦点と直交しており、Y=0 でピーク値 21.4 [-]となる。Y=1 [cm]では集光倍率 1 [-]を下回る。

## (3) Z 軸分布

Z 軸上は最大 22.4 [-]の集光倍率であった。理論上の焦点位置 Z=0 の前後で高く維持されるのは、焦点の幅が日射センサーの有する受感部径 8 [mm]より小さい影響と考えられ、計算上のピーク範囲 Z=-0.76~0.76 [cm]とほぼ対応する。

## (4) XYZ 軸分布のまとめ

焦点上においては集光倍率 21.7 [-]程度となる。また Z 軸上分布より焦点幅が集熱面の幅以下であれば集光倍率はほぼ一定となる。よって幅を有する物体への線状日射集光は効果的であるといえる。

## 2.5 レンズ回転条件での Z 軸集光分布

仮にレンズを固定設置した遮熱機構の実用化を想定すれば、太陽高度の変化に伴い日射入射角が変化する。以下ではレンズへの入射角 10~30° を想定し、同回転角度にレンズを設置して集光分布特性を把握する。

### 2.5.1 斜め入射の集光理論

Hecht<sup>[4]</sup>によると、光軸付近に限定すれば凸レンズはすべての平行な光線束を後側焦点平面と呼ばれる平面に集める (図 8)。つまりレンズに斜め入射した平行光はレンズ中心から焦点距離  $f$  離れた焦点上へ集光する。フレネルレンズは凸レンズが平面化されたもので、同様の集光が想定される。よって理論上の焦点位置は、レンズ回転時において Z 軸上に生じる。レンズ中心から焦点までの計算上の距離は表 3 の通りである。

### 2.5.2 実験結果

1/24 の集光倍率分布の測定結果を図 9 に示す。

#### (1) 10° 回転

集光倍率の最大値は Z=0.2[cm]で 9.8 [-]である。ピーク座標は表 3 の理論値とは一致しておらず、集光倍率は垂直入射時の半分以下である。

#### (2) 20° 回転

集光倍率の最大値は Z=0[cm]で 9.2 [-]である。10° 同様に、ピーク座標は表 3 の理論値とは一致しておらず集光倍率は 10° よりも低下している。

#### (3) 30° 回転

10・20° と異なり、Z=-3~2.8 でピーク値は現れない。測定範囲内では Z=2.8 で最大 8.5 [-]である。

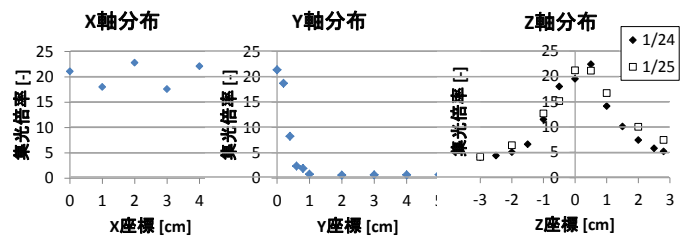


図 7 XYZ 軸上の集光倍率分布

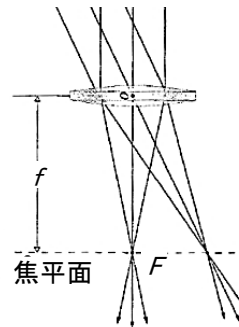


図 8 焦点平面<sup>[4]</sup>

表 3 理論上の焦点位置

レンズ回転角度	10°	20°	30°
焦点までの距離 [mm]	152.3	159.6	173.2
Z 座標 [cm]	-0.23	-0.96	-2.32

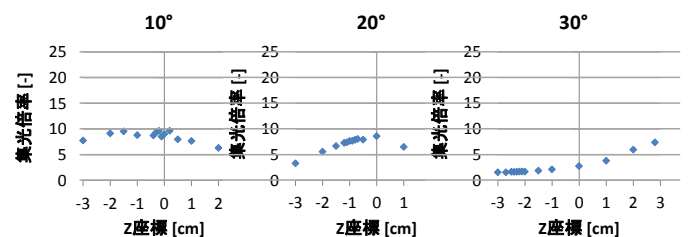


図 9 レンズ回転条件の Z 軸上集光倍率分布

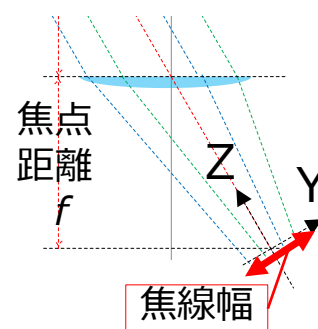


図 10 斜め入射時の焦線幅

## (4) レンズ回転条件のまとめ

集光倍率が垂直入射時より小さい結果から、日射がレンズ面へ斜め 10~30° で入射する場合、図 10 のように集光日射は Y 軸方向に日射センサー受感部以上の幅を有すると思われる。またレンズ回転角が大きいほど集光倍率が小さい傾向から、入射角が大きくなるにつれて焦線幅が広がると考えられる。よって集光日射のうち一部は集熱されない場合がある。

## 2.6 実験から得る集光パラメータ

### (1) レンズ透過率 $I_{trans}$

レンズ到達前後の日射エネルギーの比率をレンズ透過率と定め、実験値から 0.949 [-]とした。

### (2) 集熱面到達率 $r_{collect}$

集光エネルギーのうち真空集熱管で集熱される割合を集熱面到達率と定める。集熱面幅  $B_{Pipe}$  が焦線幅  $B_{Line}$  以上の場合、(図 11),  $r_{collect}$  は 1 [-]となり、 $B_{Pipe} < B_{Line}$  の場合 (図 12),  $r_{collect}$  は 1 を下回るものとする (式 (3))

### (3) 焦線幅の近似式

レンズ回転条件で測定した集光倍率から焦線幅を式 (4)より推定する。なお、この式は実験値の集光倍率に含まれるレンズ透過率の影響を除去して焦線幅を求める。

集熱面到達率の算出に当たり、高津<sup>[3]</sup>が実験で用いたレンズ幅 500 [mm]を仮に設定する。この場合に式 (4)で推定した焦線幅実測値から近似式を作成した、結果を図 13 に示す。集熱面幅  $\phi 47$  [mm]を設定すれば、集熱面到達率は図 14 の通りとなる。入射角  $0 \sim 8.4^\circ$  では焦線幅が 47 [mm]以下となり、集熱面到達率は 1 [-]となる。

## 3. 太陽熱利用空調の効果試算

遮熱機構で得られる温水を利用した太陽熱利用空調について検討する。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<sup>[5]</sup>を用いる。本研究では太陽熱利用インターフェースやデシカント空調機などの既存オブジェクトを組み合わせ対象システムを構築した。

### 3.1 システムモデル

太陽熱利用効果の効果試算として、デシカント空調機の除湿ロータ再生熱源としての利用を検討する。

太陽熱利用インターフェース (以下 IF. 図 15) は、日射により 3 [K]以上昇温可能な場合に集熱を行う制御である。

太陽熱利用デシカント空調システム (図 16) は太陽熱利用 IF で得る温水により再生コイルを運転して外気を処理するもので、温水温度が低い場合は補助熱源を稼働する。デシカント空調機運転時は、室負荷を冷却除湿空調機 (図 17) によって処理する。

また太陽熱利用有無の比較を行うため、外気を冷却除湿する場合の計算条件も設ける。

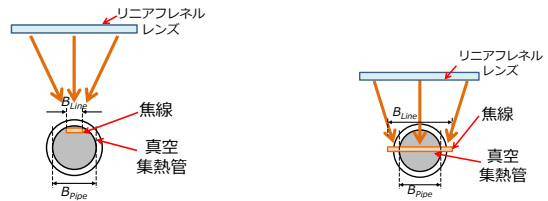


図 11  $B_{Pipe} \geq B_{Line}$  時の集熱 図 12  $B_{Pipe} < B_{Line}$  時の集熱

$$r_{collect} = \begin{cases} 1 & (B_{Pipe} \geq B_{Line}) \\ B_{Pipe}/B_{Line} & (B_{Pipe} < B_{Line}) \end{cases} \quad \text{式 (3)}$$

$$B_{Line} = B_l / r'_c \quad \text{式 (4)}$$

$r_{collect}$ : 集熱面到達率 [-],  $B_{Pipe}$ : 集熱面幅 [m],  $B_{Line}$ : 焦線幅 [m],  $B_l$ : レンズ幅 [m],  $r'_c$ : レンズ透過補正した集光倍率 [-]

入射角と500mmレンズの補正焦線幅

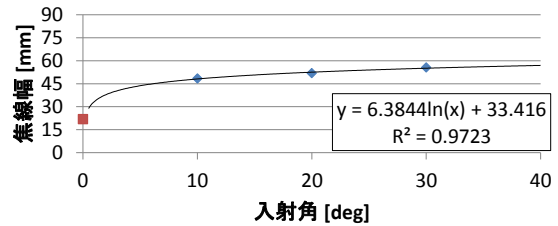


図 13 入射角と焦線幅

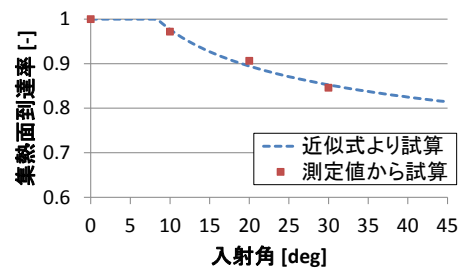


図 14 入射角と集熱面到達率

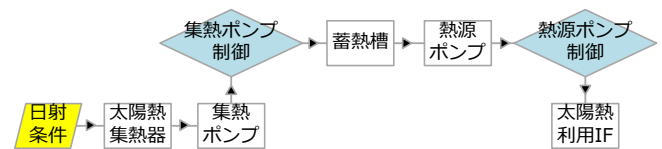


図 15 太陽熱利用インターフェース

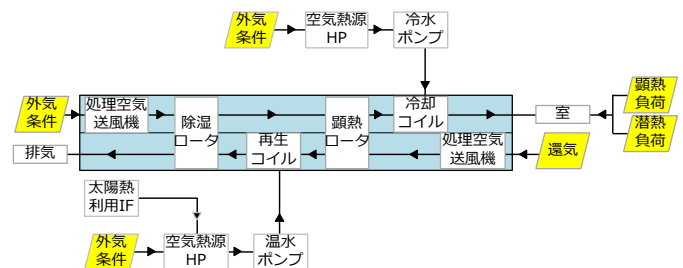


図 16 太陽熱利用デシカント空調システム

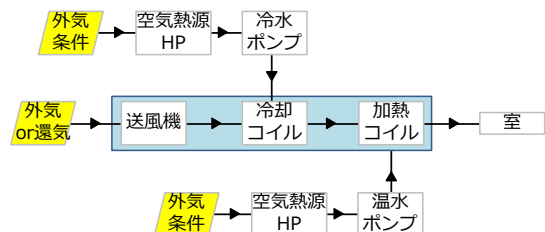


図 17 冷却除湿空調システム



### 3.2 計算対象室の設定

計算対象は滝沢<sup>[6]</sup>の標準問題オフィスを基に在室者数・照明負荷を定め、室内の顕熱負荷 33.9 [kW] および潜熱負荷 10.6 [kW]を設定した。夏季冷房時のオフィスを対象に太陽熱空調利用効果を検討する。

外気の吹き出し条件は、過冷却が必要ないデシカント空調機では室条件と同じ 26 [°C]・50 [%]とし、空気を露点近くまで冷やす冷却除湿空調機は 18.5 [°C]・86 [%]とした。この外気吹き出し条件が異なる影響をなくすため、室負荷処理空調機の吹き出し条件を調節する。

### 3.3 計算条件

試算条件は表 4 に示す計 4 条件である。Case1 は真空集熱管を用いた遮熱機構で、集熱管を軸にレンズを回転させて太陽を追尾し、常に日射を垂直入射させて集光する条件である。

Case2 は遮熱機構のリニアフレネルレンズを固定し、真空集熱管を集光位置に移動させて追尾を行う条件である。Case2 は入射角が 0 でないため、集熱面到達率が 1 を下回る場合がある。

Case3 は平板型集熱器を壁面に設置した条件である。Case4 は建物壁面に太陽光発電パネルを設置した条件で、温水は作らずに発電量を試算する。

Case4 を除き外気負荷処理はデシカント空調を用い、室負荷処理は全条件で冷却除湿空調とする。なお Case1,2,3 と Case4 では各給気温湿度が異なる。

### 3.4 遮熱・集熱機構モデルの設定

Case3,4 は対象建物 1 フロアの窓面を含む壁面積より集熱面積 87.4 [m<sup>2</sup>]と定める。これに対し、Case1,2 は同壁面へのレンズ斜め 30° 設置を想定し 174.7 [m<sup>2</sup>]とする。設置方位は全て南向きである。

Case1,2 の集光対象は直達日射量のみである。また、Case1 と Case2 では太陽の追尾方法が異なるので、集熱面到達率に差が生じる場合がある。

Case3, 4 はそれぞれ壁面全体に集熱器およびパネルを固定設置するとして扱う。Case3,4 は直達日射と天空日射で集熱・発電を行う。

### 3.5 試算結果

拡張アメダス気象データより東京の標準年気象条件を入力値とする。晴天代表日として 8/10 を抜き出し、また 6/1~9/30 の冷房期間の計算を行う。

#### 3.5.1 集熱量

Case1~3 で 8/10 の集熱量を比較する。集熱量を図 18 に示す。Case1 と Case2 は太陽高度が 60° 近く入射角が小さいときにほぼ同程度の集熱量となる。よ

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（回転追尾） +真空集熱管（固定）	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（固定） +真空集熱管（移動追尾）	デシカント 空調機	冷却除湿 空調機
Case3	平板型集熱器（壁面固定）	デシカント 空調機	冷却除湿 空調機
Case4	太陽光発電パネル（壁面固定）	冷却除湿 空調機	冷却除湿 空調機

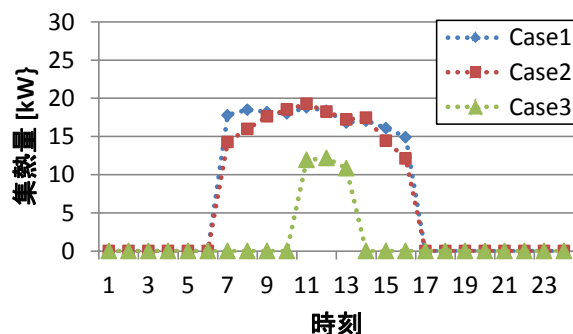


図 18 集熱量の比較 (8/10)

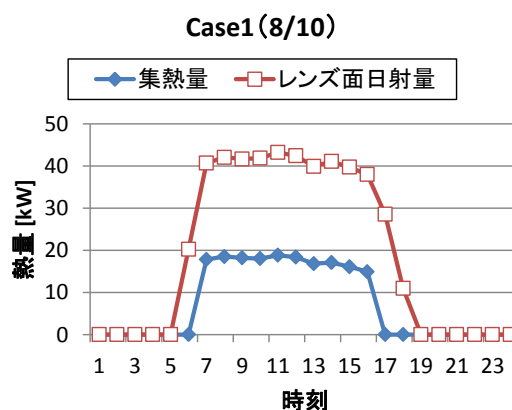


図 19 集熱量とレンズ面到達直達日射量 (8/10)

ってレンズを固定し集熱管を移動させる場合でもレンズ回転追尾に近い集熱量が得られている。

Case3 は壁面設置で集熱面積が小さく、3 [K]以上昇温可能な期間が短い。

Case1 における集熱量とレンズ面に到達した直達日射量を図 19 に示す。レンズで集光される直達日射量は平均約 40 [%]が集熱に利用される。つまり遮熱機構では窓面到達日射量の 40 [%]程度が潜熱となる。図 1 に示した夏季のダブルスキンにおいて、窓面到達日射量の 60 [%]近くが顕熱として放散されていたことに比べれば、遮熱機構による大気放熱低減効果を確認できる。

### 3.5.2 冷房期間中の積算消費電力

6/1 から 9/30 まで 122 日間について検討する。各条件の積算消費電力量を図 20 に示す。

Case1, 2 の消費電力は同程度であり、Case3, 4 に比べて熱源消費電力が小さい。これは遮熱機構で得られる集熱量が大きいためであり、日射を潜熱として処理する熱量が冷房期間中で大きいといえる。

Case4 の熱源消費電力が大きい理由は、夏季の高温高湿な外気を冷却除湿して給気するためと考えられる。よって夏季外気はデシカント空調機による除湿が有利であるといえる。ただし Case4 は積算発電量 1.48 [MWh] を差し引けば、積算消費電力が 41.5 [MWh] となり、Case3 と同程度になる。

### 4. まとめ

- ◆ 夏季のダブルスキン熱収支において、窓面日射量に対して流出顕熱（換気+外部対流）は 60 [%] 程度である。
- ◆ 屋外日射環境でリニアフレネルレンズ集光実験を行い、集光位置や集光倍率について検討した。レンズ垂直入射時の焦線上はほぼ様な集光倍率となり焦点距離の前後は倍率がほぼ一定となった。よってリニアフレネルレンズによる集熱管への線上集光は効果的であるといえる。
- ◆ レンズ斜め入射時は垂直入射に比べて倍率が低いことがわかり、焦線幅が増大していると思われる。よって焦線幅が集熱面幅を超えた場合、集光日射の一部は集熱に寄与しない。この割合を集熱面到達率として定義した。
- ◆ 遮熱機構で得られる温水利用効果として、夏期除湿空調利用効果を試算した。入射角が小さい期間において、レンズを固定する Case2 では、レンズを太陽に正対するように追尾する Case1 と同程度の集熱量が得られた。
- ◆ 夏季晴天時において、Case1 の集熱量はレンズに到達する日射量の 40 [%] 程度であり、遮熱機構による日射熱の潜熱処理効果が確認できた。

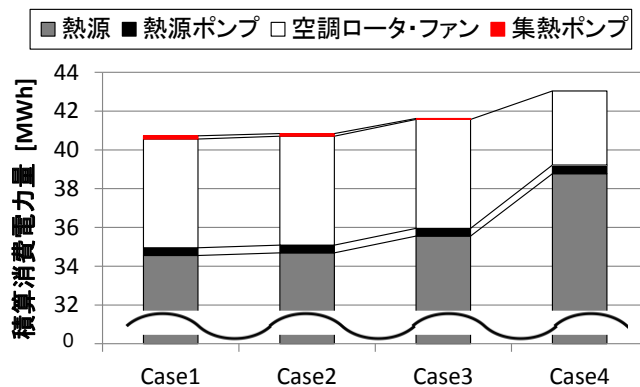


図 20 冷房期間の積算消費電力量

### 5. 今後の課題

- ◆ 設備の稼働率を高めるためには遮熱機構の年間利用が求められる。本研究では夏季のみの空調利用効果を試算したが、冬季の太陽熱利用暖房の効果試算についても検討すべきである。
- ◆ 夏季の遮熱機構による集熱量を試算した。潜熱となる集熱量は得られたが、他の熱流成分は把握できていない。遮熱機構を導入したダブルスキンの熱収支について今後検討すべきである。

### <参考文献>

- [1] 水野知明ほか、現代建築の外壁面における<ガラス率>、日本建築学会学術講演梗概集、F-2、建築歴史・意匠、(2006)、pp.715-716.
- [2] 山本佳嗣ほか、寒冷地に建つアトリウムとダブルスキンファサードを持つ複合施設の環境性能評価 第 2 報 ダブルスキンファサードの日射遮蔽性能・熱収支、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、(2007)、pp.2253-2256
- [3] 高津竜斗ほか、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—、空気調和・衛生工学会大会学術研究発表会論文集 第 2 巻、B-37 (2014)、pp145-148.
- [4] Eugene Hecht (訳：尾崎善治・朝倉利光)、ヘクト光学 I —基礎と幾何光学—、丸善株式会社、(2002)、pp.243-246.
- [5] 官庁営繕：ライフサイクルエネルギーマネジメント (LC EM) - 国土交通省 URL [http://www.mlit.go.jp/gobuild/sesaku\\_lcem\\_lcem.html](http://www.mlit.go.jp/gobuild/sesaku_lcem_lcem.html)
- [6] 滝沢博、標準問題の提案 (オフィス用標準問題)、社団法人日本建築学会 環境工学委員会 熱分科会 第 15 回熱シンポジウム、(1985).

## 討議

### 討議 [鍋島先生]

方位角と太陽高度が変わることに違いはあるか？  
ずれ方が変わると集熱効率は変わらないのか？また、  
レンズを入射角度によって移動させるのか？

### 回答

焦線が水平方向に生じるようにリニアフレネルレンズを設置する場合について考える。レンズが太陽に正対する場合はレンズの背後に焦線が生じる(図A)。これに対して太陽方位がずれた場合、焦線位置は水平方向のずれに影響すると考えられる(図B)。

よって、集熱面がレンズ長さ(焦線長さ)に対して十分に長く、焦線の水平方向へのずれを許容できる場合であれば、太陽方位変化に伴う焦線位置のずれに対応する必要性は生じない。一方、集熱面が十分に長くはない場合は、太陽方位変化に対する追尾が必要となる。このことから、集熱管を長くすることと追尾機構の導入について、コスト面などで比較を行うべきだと考えられる。

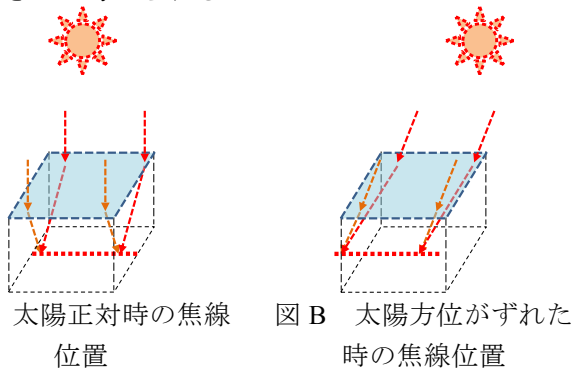


図 A 太陽正対時の焦線位置

図 B 太陽方位がずれた時の焦線位置

### 討議 [梅宮先生]

天空日射の除去はどのような方法で行ったか？また日射減衰板の大きさは？

### 回答

天空日射量は、別途行った直達日射を遮蔽する実験によって把握しており、その値を差し引いている。日射遮蔽板や日射減衰板は実験で用いるリニアフレネルレンズと同寸法のものを用いている。

### 討議 [矢持先生]

波長によって熱量が異なるが、そのような検討は必要ないのか？

### 回答

日射の強度は図Cのように波長ごとに大きく異なる。実験で用いた日射センサーは受感部がシリコン製のもので測定波長域は400~1100 [nm]だが、測定波長域の日射量から1100 [nm]以降を含めた全波長域の日射量を推定して出力するように校正されている。よって本研究は日射全波長域について検討している。

曇天時は日射のスペクトルが変化すると考えられるが、本研究では直達日射を集光対象とした遮熱技術について検討しているため、晴天日の日射条件を扱った。

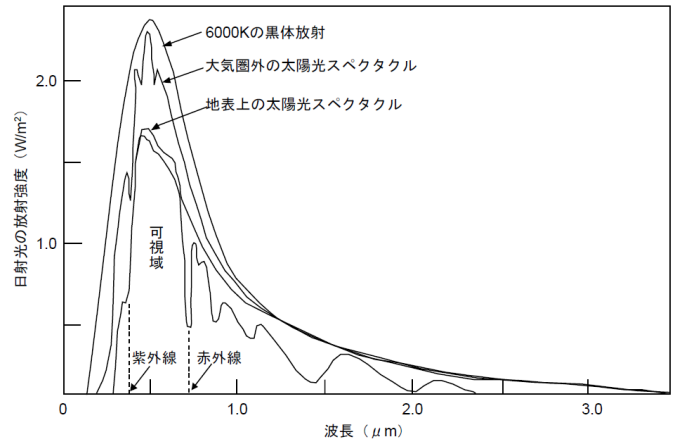


図 C 波長別日射強度と大気の吸収

(引用:「ソーラー建築デザインガイド」独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構)

### 討議 [梅宮先生]

積算消費電力量で消費電力量 Case1 と Case2 に差がなかった理由は？

### 回答

試算期間を冷房期間としたため、レンズ設置角を30°として夏季の南中高度付近で入射角が小さくなるようにしている。よって、太陽高度が高い時間ではCase2の集熱面到達率は1に近くなり、Case1と同程度の集熱量が得られたと考えられる。