Design of wall-mounted solar collector with concentration by a parabolic mirror

壁面設置型集熱器に向けた 放物面鏡を用いた太陽集光系の設計

Atsushi AKISAWA 秋澤 淳^{*1‡}

研究論文

Ryo KASHIIDE 樫出 亮^{*2} Masayuki NAKAYAMA 中山政行 ^{*3}

Abstract

The objective of this study is to evaluate the performance of vertically mounted solar collector with a parabolic mirror for solar concentration to boost the energy density. A flat absorber is attached to the bottom of the parabolic mirror. Ray-tracing simulation was employed to estimate the recovery of solar irradiation and to find out the optimal settings of the geometrical parameters of parabola shape such as the focal length and the inclined angle. The system is assumed to be within the depth of 100 mm for being mounted on a wall. The objective function to be maximized was the energy intensity of solar irradiation captured on the absorber in winter season, i.e. from November until February. It was derived from the sensitivity analysis of the design parameters that the focal length of 95 mm and the angle of 25 degree would be optimal. The parabolic mirror effectively collects the sunlight so that the reflected sunlight contributes to 74-79 % of the solar intake every month. From the viewpoint of annual performance, it was predicted that the proposed system would provide quite high energy density in winter while very small one in summer, which is considered preferable because the behavior is in accordance with the change of heat load for residential buildings during a year.

Keywords: Solar collector, Parabolic mirror, Concentration, Wall-mount, Optical design キーワード:太陽集熱器,放物面鏡,集光,壁面設置,光学系設計

1. はじめに

日本における太陽熱の住宅用利用には平板型集熱器を使っ た温水製造が広く用いられている.集熱器は傾斜した屋根 に設置されるか,または屋根に置いた架台に設置される場 合が多い.近年ベランダの手すり部分に垂直に設置される 太陽集熱器が提案され,集合住宅に導入された例⁽¹⁾があ る.ベランダの外側にやや傾斜させて設置した事例⁽²⁾もあ る.一方,ヨーロッパでは高層の集合住宅の壁面に平板型 集熱器を埋め込んだり,庇のように集熱器を取り付けた住 宅の事例が見受けられ,日本よりも集熱器の設置方法に多 様性がある.

*1 東京農工大学大学院工学研究院教授 (〒184-8588 東京都小金井市中町2-24-16) ‡ e-mail: akisawa@cc.tuat.ac.jp

*2 元東京農工大学大学院生物システム応用科学府大学院
*3 東京農工大学大学院生物システム応用科学府特任助教
(原稿受付:2017年12月1日,受理日:2018年2月28日)

2012年に制度化された再生可能電力の固定価格買取制度 により住宅やビルの屋根に太陽光発電パネルを設置する事 例が大きく増えた.売電のために屋根や屋上のスペースを 太陽光発電パネルが占める傾向が強まったといえる.この 状況を受け,太陽集熱器の設置に現在利用されていない壁 面を活用することは太陽熱利用を確保する一つの候補と考 えられる.より多様な設置方法を用意することは,太陽熱 利用の導入を促進する上で有効と予想される.

平板型集熱器を垂直に設置すると、太陽の日射が斜めに 入射するため得られるエネルギーの密度が低下する.これ は温水の温度を上げにくくなることを意味する.言い換え れば、部材として高価な選択吸収膜をコーティングした集 熱部のコスト・パフォーマンスが低下する.性能低下を回 避するには、反射鏡を用いて太陽光を集光し、集熱部での エネルギー密度を高める方法が考えられる.集光を伴う大 型の太陽集熱器にはトラフ型放物面鏡やフレネルミラー型 集光系が応用されている⁽³⁾が、太陽を1軸追尾し、常に太陽 光を受光部に受けるようにミラーの角度が制御される.一 方、小型の集光方式にはCPC(複合放物面鏡、Compound



Fig. 1. Cross-sectional view of CPC consisting of two parabola surfaces.

Parabolic Concentrator)が1970年代に提案されている. CPCは図1に示す通り2つの放物面鏡を組み合わせることに より、CPC本体は固定されているにもかかわらず、太陽光 の入射角が真正面からある一定範囲内にある場合には受光 部に光を集めることができる特性を持つ⁽⁴⁾.すなわち、ミ ラーが固定されていても太陽の移動をある程度カバーする ことができる. CPCを用いた集熱器については新たな形状 の研究も行われている^(5,6).

反射鏡で集光することは相対的に高価な受光部の面積を 低減する一方,エネルギー密度を高めることによって集熱 温度を上げる効果がある.業務用のソーラークーリングで は吸収冷凍機の熱源として比較的高温の温水を回収するた め,CPC型反射板が取り付けられた真空管型集熱器が使用 されている例が多く見受けられる^(7,8,9).また,回収する温 水の温度が高ければ一定の容量の貯湯槽に蓄えられる熱量 も多くなり,設備の利用効率の観点からも有効である.

そこで、本研究では住宅建物の壁面に垂直に設置する太 陽集熱器のための集光系を設計することを目標とする.壁 面に設置する場合、奥行きを小さく取ることが必要になる. 同時にできるだけ集光ミラーを簡単化することを考え、CPC ではなく単純な放物面鏡を用いることとした.これはCPC のように2つの放物面によって真正面から両側にずれる許 容範囲を持たせるのではなく、片側のみの放物面を使う方 式とも解釈できる.日本では夏季は太陽熱が取れすぎてし まうことが課題となっている.したがって、放物面鏡で太 陽高度の低い冬季を中心に集光し、冬季に大きく増加する 温水負荷に充当する集光集熱方式の可能性を評価すること を本研究の目的とする.

2. 壁面設置される放物面鏡を伴う太陽集熱器

2.1 太陽集熱器の構造

太陽光を集光する放物面鏡は、真正面から入射する光を 焦点に集める働きをする.ここでは、図2に示す通り放物 線の軸を斜めに傾斜させて用いる.放物面鏡は紙面の奥行 き方向にある長さを持つ線形な形状をしている.なお、こ の放物面鏡はある一定の奥行きの範囲に収めるものとし、



Wall surface



集熱器の奥行きdは100 mmと仮定した. 受光部(集熱部の 上面)は放物線の焦点の位置に,壁面側の放物面から壁面 前方100mmまで水平に設置されている. 放物線の軸の傾 きと太陽高度が一致した時,日射は集熱部の焦点に一点に 集光される.

本集熱器およびミラーは壁面に垂直に固定され、太陽を 追尾しない.非追尾で集光する方式に着目する.

2.2 設計の基本的考え方

集熱器の設計はミラーの断面である放物線の形状を決め ることに他ならない. 放物線は軸の傾きと焦点距離の2つ のパラメータによって規定される. すなわち, この2つが 提案する集熱器の設計変数となる.

そこで、軸の傾きと焦点距離を独立して変化させ、集光 性能を最大にすることによって放物線の形状を設計する. ただし、どの場合でも壁面の奥行き100 mmに収まること を条件とした.この時、放物線の位置を壁前方に移動させ て調整した.最大化する指標としては、冬季(11月~2月) における受光部面積あたりの積算集光量とした.これは冬 季の温水負荷が卓越することから、冬季の化石燃料消費を 代替することを目標としたためである.

2.3 設計条件

設置地点は東京とした.壁面は南向きを仮定した.実際 にも南向きの住宅の割合が多い.また,簡単のために放物 面鏡の反射率を100%,受光部の吸収率も100%を仮定した. 集熱器の東西方向の長さは1mとした.放物線の軸の水平 からの角度φ=15°~40°について解析した.

3. シミュレーションによる集光系の設計

3.1 設計パラメータが放物面形状に与える影響

軸が水平の場合の放物線は、P(mm)を放物線の焦点距離 として次式で表される.

$$x = \frac{y^2}{4P} \tag{1}$$

この形状をφ(rad)回転させることによって,(2)式の傾いた 放物線を得る.

$$x\cos\phi + y\sin\phi = \frac{(x\sin\phi - y\cos\phi)^2}{4P}$$
(2)

この放物線は壁の奥行き方向に凸な形状をしている。所 定の奥行き幅に入る範囲が有効な放物線となる。放物線の 最も端となるx座標は次で与えられる。

$$x_0 = -P\sin\phi\tan\phi \tag{3}$$

したがって、(2)式の形状をx方向にxoだけ移動させる.

$$\begin{aligned} x_f &= P\cos\phi\\ y_f &= P\sin\phi \end{aligned} \tag{4}$$

本研究では焦点の高さを受光面の位置に取ることとしている。そこで、(2)式の放物線を-y方向にyfだけ移動させ、受 光面がy=0の位置にくるように調整する。最終的な放物線 は次式で表される。

$$(x - x_0)\cos\phi + (y + y_f)\sin\phi = \frac{\{(x - x_0)\sin\phi - (y + y_f)\cos\phi\}^2}{4P}$$
(5)

ここで, (*x*, *y*)は次式の範囲である. *d*は壁面からの幅(ここでは100mm)を, *H*は開口部の高さを示す.

$$\begin{array}{l}
0 \le x \le d \\
0 \le y \le H
\end{array} \tag{6}$$

放物線の軸の角度と焦点距離を変化させてミラー形状が どのように変わるかを調べた.角度φ=30°と40°についての 結果を図3に示す.ある軸の角度に対して,焦点距離を長く するとミラーの高さ方向が長くなり,日射の取り入れ口が 大きくなる傾向が見て取れる.また,受光部幅(奥行き方 向の長さ)は焦点距離が長くなるにつれて減少する.図4 に設計パラメータφおよびPに対する焦点位置xrの変化を示 す.焦点距離が長くなるほど放物線が壁面前方に移動する ため,焦点の位置が受光部幅100mmを超える状況が見て 取れる.すなわち,受光部よりも前方になる場合が生じて いることがわかる.

3.2 集光密度を最大化する設計

設定した放物面ミラーに対し,レイトレーシングシミュ レーションツール⁽¹⁰⁾によって集光性能を評価した.入射光 は平行光線を仮定し,日射強度は1000W/m²と設定した.

放物線の軸の角度と焦点距離を変化させて受光部での積 算入射エネルギー密度(MJ/m²)を計算した結果を図5に 示す.それぞれの軸の角度に対し,焦点距離を長くするに つれてエネルギー密度は上昇するが,ある長さから低下に 切り替わる.エネルギー密度が上昇する領域においては, 焦点距離が長くなるにつれて開口部が大きくなることによ る.さらに焦点距離が長くなると,前述の通りミラー全体 の形を保ったまま位置が壁面前方に移動する.その結果,





of parabolic mirror.



Fig. 4. Effect of focal length on the position of focus in *x*.



Fig. 5. Effect of design parameters on the cumulative solar energy intensity on the absorber area.



Fig. 6. Effect of design parameters on the cumulative solar energy density on the basis of aperture area.

焦点の位置が受光部よりも前方になり,太陽高度が軸の角 度と同程度でも受光部を外れる光が増える.それに伴い受 光部への日射量が減少することにより,減少傾向に転じて いる.軸の角度が大きくなると太陽高度が低い場合に受光 部外に漏れる日射が多くなるため,低下傾向が顕著になっ ている.

図5の結果より,それぞれの軸の角度におけるエネルギー 密度の最大値は大きな違いがないが,最もエネルギー密度 を高くする設計は軸の角度φが25°,焦点距離*P*が95mmで あることが導かれた.最適設計における開口部の高さは 321mmとなる.

一方, 集光系の開口部面積あたりの積算入射エネルギー 密度を計算した結果を図6に示す.開口部面積あたりでみ ると, エネルギー密度は焦点距離に対して単調減少の傾向 を示す. これは焦点距離が長くなるほど開口部高さが大き くなることに起因する. そのため開口部高さが小さくなる 設計が有利となるが, 受光部面積あたりのエネルギー密度 で不利になる. ミラーによってコストが相対的に高い受光 部を減らすことが本集光系のねらいであるので, ここでは 受光部面積あたりのエネルギー密度を最大にする設計を採 用した.

3.3 太陽高度に対する集光状況

最適な設計条件において、日射の入射角度(真南方向) による集光の様子を調べた結果を図7に示す.最適な設計 の焦点距離は95mmであるが,放物面が壁面前方にずれる ことから焦点は壁面から105mmの位置にあり、受光部を 外れている.入射角度が20°の場合には受光部の前方に集 まり、受光部から外れる光が生じることが見て取れる.入 射角度が30°よりも大きくなると受光部の縁より奥側に日 射が集められる.すなわち,設計角度よりも太陽高度が高 い場合には入射した日射は受光部に集光される.ただし、 受光部の奥の点とミラーの上部の縁を結ぶ角度よりも太陽 高度が高くなるとミラーの集光効果はなくなり,直接受光 部に当たる日射のみが回収されることになる.したがって、



(a) 20 deg (b) 30 deg (c) 35 deg (d) 45 deg Fig. 7. Behavior of sunlight reflection with the optimal design settings (Azimuth=South).



Fig. 8. Contribution of parabolic mirror in comparison with direct solar intake.

太陽高度が高くなる夏季には放物面鏡による集光機能は低 下する.

3.4 反射ミラーの寄与

11月~2月の各月における積算集光量の内,太陽から直 接到達した分と放物面ミラーで反射されて入射した分をそ れぞれ示したグラフを図8に示す.どの月でもミラーの寄与 率は概ね同じであり,集光量全体の74%~79%を占める. すなわち,直接入射する分の3~4倍程度の日射をミラーが 集めており,放物面ミラーの寄与は非常に大きく,効果的 であるといえる.

また、ミラーの効率を図9に示した.ミラーの効率はミ ラーに入射した光の内で受光部に達した比率を示す.どの 月でも正午付近の効率は非常に高く、95%を上回る.正午 の太陽高度は設計角度よりも大きいため、反射した光は受 光部に到達する.その一方、正午を外れるとある時刻から 効率が急激に低下する.12月では4時間程度しか集光能力 を持たないが、2月では8時間程度集光が継続する.太陽高 度の低い12月では午前または午後にミラーに斜めに入射す る日射が受光部の外側に反射されることに起因する.しか しながら、今回の計算条件では集熱器の長さが1mであ り、開口部の高さに比べて短いことが一因である.集熱器 の長さを十分に長く取れば、ミラーの効率は改善されると 予想される.



Fig. 9. Behavior of mirror efficiency during daytime.

4. 月別の集光性能の評価

4.1 比較ケース

提案システムは冬季に効果を発揮する設計であるが,夏 季を含めた通年で従来型システムと集光性能を比較する. 比較対象には次のシステムを選定した.

・水平からの角度30°の平板型集熱器

・垂直(角度90°)に設置された平板型集熱器

これらは屋根置きの平板型集熱器,ベランダ設置型の平板 型集熱器を想定したものである.

4.2 月による集光密度の変動

レイトレーシングシミュレーションによって各月の受光 部面積あたりの積算受光量(エネルギー密度)を計算した 結果を図10に示す.従来型の30°設置の場合,年間を通じ てほぼ同程度のエネルギー密度を維持するのに対し,90° 設置の場合は冬季は30°設置と同程度であるが,夏季には 太陽高度が上がるためにエネルギー密度が大きく減少する 傾向を示す.提案する放物面鏡による集光系では90°設置と 同様に,冬季に大きく夏季に小さくなる.ただし,ミラー による集光効果によって冬季のエネルギー密度は90°設置 に比べて約2.5倍に増大する.ミラー集光効果は10月から3 月にかけて非常に強く,ちょうど熱負荷が高くなる時期に 一致している.この点は冬季に温度が高い温水を回収する ことに役立つといえる.密度を2.5倍に高められることは, ミラーに比べて費用がかかる受光部をそれだけ小さくでき ており,コスト低減につながることが示唆される.

一方,5月~8月の夏季においては30°設置の場合よりも 受光密度が下まわる.提案システムは垂直設置を想定して いるので,90°設置の平板型と同一面積の開口部に入射す るエネルギーは同じである.住宅用の場合,夏季は熱負荷 が減少するので,熱回収量が減少することはちょうど負荷 の挙動に適合しているといえる.なお,負荷がない時に集 光があると夏季は集熱部の温度が上昇して機器側にストレ スが発生する恐れがある.提案システムでは夏季にミラー 集光機能が低減することで集熱能力が低下し,自動的に温



Fig. 10. Comparison of monthly accumulated solar intake by the proposed system with conventional flat plate solar collectors.



Fig. 11. Cumulative solar intake of each section of the absorber. (Section1= at the bottom of the mirror, Section5= at the wall surface)

度上昇を抑制することで機器の保全にもつながる. これは CPCのように2つの放物面を使わず,一方だけにしたことの 効果であると解釈できる.

4.3 受光部における集光分布

図2に示す100mmの奥行きを20mmごとに5つのセクショ ンに分割し、セクションごとの集光密度を調べた(奥側が セクション1、開口部側がセクション5. 放物面鏡に接する セクション1の幅は20mmよりやや小さい). その結果を 図11に示す. 12月には最も外側のセクション5が他に比べ て極端に集光が多い. 11月と1月においては、セクション4 にも集光が集まり、4および5が中心的に働いている. 2月 になるとセクション3の集光が伸び、セクション5は縮小し ている. 太陽高度が上がるにつれてミラーによる集光が徐々 に奥行き側に移行する様子が見て取れる. 冬季の場合には、 どの月でもセクション1およびセクション2はあまり機能し ていない.

このことから,セクション1と2の集熱部を取り除けば, 夏季の集熱量をさらに低減させることも可能であり,一層 年間の負荷変動に合わせることができると考えられる.

5. おわりに

本研究では建物の壁面に垂直設置される放物面鏡を用い た太陽集熱器を提案し、その集光性能をレイトレーシング シミュレーションによって評価した.その結果、次の知見 を得た.

- 東京を設置場所とした場合、放物線の軸の角度を25°、
 焦点距離を95mmとする放物面鏡が受光部でのエネル ギー密度を最大にする。
- ・ 従来型の30°設置の平板型集熱器と比べ,提案システム の受光密度は冬季で約2.5倍になる一方,夏季は従来型 よりも小さくなる.
- ・ 提案システムの集光性能は年間の熱負荷変動にちょう ど合っており、太陽熱の利用に適している.

放物面鏡を用いることにより,相対的に高価な受光部を 減らすことが可能になる.また,受光部でのエネルギー密 度が高まることは温水温度を上げることにも効果があると 予想される.

提案する放物面鏡を用いた集熱器は建物の壁面への設置 を想定している.壁面を有効に使えれば太陽熱利用の設置 ポテンシャルが高まると予想され,電力だけでなく熱も含 めたZEH (ゼロエネルギーハウス)の実現に寄与すると期 待される.今後,実験によって集熱性能を実測することが 課題である.

本研究の一部はLIXIL住生活財団による研究助成を受けた.関係各位に感謝申し上げる.

記号定義

- d: 奥行き幅 (mm)
- H: 開口部高さ (mm)
- P: 放物線の焦点距離 (mm)
- *x*: 放物線の*x*座標 (mm)

- *x_f*: 焦点の*x*座標 (mm)
- x0: 放物線上で最も奥となる点のx座標 (mm)
- y: 放物線のy座標 (mm)
- yf: 焦点のy座標 (mm)
- φ: 放物線の軸の角度 (rad)

6. 参考文献

- ソーラーシステム振興協会ホームページ,集合住宅用設置事例 (Nov. 2017), http://www.ssda.or.jp/example/apartment/
- サンジュニアホームページ,業務用太陽熱給湯システム事例集 (Nov. 2017), http://www.sunjunior.co.jp/business/solar_case/ index.html
- 3) 新エネルギー・産業技術総合開発機構編,NEDO再生可能エネ ルギー技術白書 第2版, (2014), 森北出版, 東京.
- R. Winston, C. Juan, P. Benítez, Non-Imaging Optics, (2005), Elsevier Academic Press, Cambridge.
- M. Umair, A. Akisawa, Y. Ueda, Optimum Settings for a Compound Parabolic Concentrator with Wings Providing Increased Duration of Effective Temperature for Solar-Driven Systems: A Case Study for Tokyo, Energies, 7(1), 28-42, (2013).
- A. T. Tiruneh1, W. N. Ndlela1, T. H. Gadaga1, T. Debesay, J. Heikkilä, A Four-Wing Compound Parabolic Concentrator (CPC) Design for Heating and Sanitization of Waste Products, Journal of Power and Energy Engineering, 5, 18-35, (2017).
- N. Nakahara, Y. Aoki, H. Itoh, Study on Systems Application of CPC Solar Collector Part 1 – Characteristics of Collector Performances of a Unit, Trans. of The Society of Heating, Air-Conditioning Sanitary Engineers of Japan, 29, 37-49, (1985). (in Japanese)
- N. Nakahara, Y. Aoki, Study on Systems Applications of CPC Solar Collector Part 2 – Theoretical Analysis on the Optimum Arrays of Collectors, Trans. of The Society of Heating, Air-Conditioning Sanitary Engineers of Japan, 30, 49-58, (1986). (in Japanese)
- N. Nakahara, K. Okada, H. Niwa, Study on Systems Applications of CPC Solar Collector Part 4 – Actual Operating Results of Solar Facilities for Chita Citizen's Hospital, Trans. of The Society of Heating, Air-Conditioning Sanitary Engineers of Japan, 33, 61-73, (1987). (in Japanese)
- Lambda Research Corporation, Solar Collector Design and Analysis using TracePro (Nov. 2017), https://www.lambdares.com/wp-content/ uploads/2017/02/Lambda-Solar-Collector-Data-Sheet.pdf