

自然追尾自然循環式太陽熱 温水器に関する研究

Study on Natural Tracking and Natural Circulation Type
Water Heater Utilizing Solar Energy

重 安 邦 之*
Kuniyuki SHIGEYASU

Abstract

This paper deals with the water heater utilizing solar energy. The collectors of conventional solar water heaters receive sunlight with flat planes which make it difficult to obtain hot water in winter because of the low energy density on the planes. To realize high temperatures, the energy density must be increased by tracking and condensing sunlight.

The collector proposed in this paper is constructed with many cells which focus the sunlight to an interior surface at the end of each cells, and this makes it possible to condense sunlight efficiently without tracking the sun. In addition, this collector is capable of storing hot water in its heat insulated tank when it is provided with a natural circulation type heat receiver in which convection occurs only in the portion heated by the condensed sunlight.

In this paper, the design of this new type water heater and its characteristics are described.

1. 緒 言

石油危機以来太陽熱温水器の普及はめざましく、家々の屋根には密閉式や循環式の温水器が数多く見られるようになった。これらの温水器は春から秋にかけてそのまま湯として使用でき、冬には追加加熱するだけでよく、エネルギーの節約に大いに役立っている。

これらの平板形の太陽熱温水器に対してより高温の湯を得るために、従来からフレネルレンズ¹⁾を用いたもの、あるいは反射鏡を用いた集光形^{2),3),4)}の温水器が試みられている。しかし集光形の装置は、許容偏角²⁾からはずれた光は受光面に焦点を結ばないため、常に焦点を結ぶための追尾装置が必要となる。この追尾装置を一般家庭用の温水器に取付けることは経費の面から困難であり、現在まだ実用化されていない。そこで、我々は次のような試作を行った。すなわち、内面が光を反射する台形三角錐の集光装置（以下集光セルと呼ぶ）を数多く球状に配置することにより、集光と追尾⁵⁾を自然に行える集光装置を考えた。そしてこれを自然循環式の受熱器の前面に置き、集光形の温水器を製作した。

本論文は、集光装置の提案およびこれを応用した自

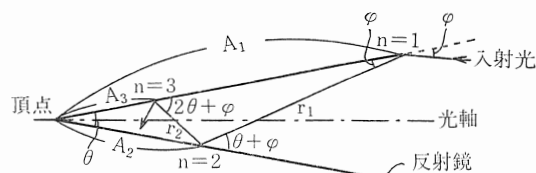


図1 入射光の反射経路

然追尾自然循環式の太陽熱温水器の可能性について報告するものである。

2. 集光装置

2.1 集光原理と形状の決定

図1のように、反射鏡を頂角 θ で対面させた集光装置を考える。開口部へ入射した光は、全反射をくり返し、内部へと導かれて行く。反射に減衰が無ければ、断面積が小さくなった割合だけ入射光のエネルギー密度が高くなる。

開口面積と受光面積の比、すなわち、集光比⁴⁾を大きくしエネルギー密度を高くするためには、頂角を大きくするか、あるいは頂角を小さくし集光装置の光軸

* 徳山工業高等専門学校 情報電子工学科
Tokuyama Technical College Computer
Science Department

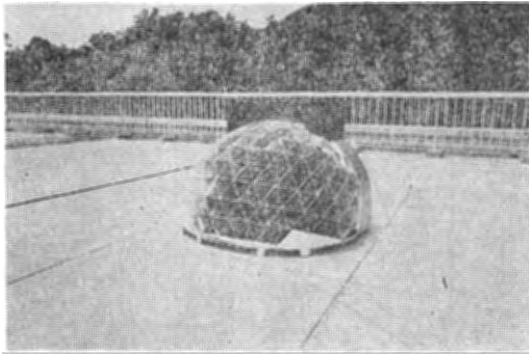


写真1 自然追尾自然循環式の太陽熱温水器

を長くするか二つの方法が考えられる。前者の場合は、許容偏角が小さくなり、入射光が許容偏角を起えた場合は入射光は途中で減衰するか、あるいは入射方向に反射される。また後者の場合は、一個の集光セルの許容偏角が大きくなるが、写真1のように数多く積み重ねた場合、平行光線と集光装置とのなす角が許容偏角を起えた集光セルでは前者と同様な現象が起り、装置全体としての許容偏角を減少させてしまう。その結果総入射エネルギーが減少し、効率が低下する。以上のことからいずれの場合も、集光比と許容偏角は反比例の関係にある。

今回試作した集光セルは、製作上容易な台形三角錐とした。この集光セルへの入射光は、光軸に対してスパイラルに反射をくり返し、受光口まで進む。このため反射経路を解析することは困難である。そこで図1のような鏡を用いて二次元平面上で、集光セルの開口部に入射した光がどこまで侵入できるかを、頂角 θ と入射角 φ をパラメータとして計算を行った。

図において

θ ……集光セルの頂角

φ ……反射鏡と入射光のなす角

A_n ……頂点から n 回目の反射点までの距離

r_n …… n 回目の反射点から $(n+1)$ 回目の反射点までの距離

である。この図から計算式は次のように表される。

$$A_{n+1} = A_n \cos \theta - A_n \sin \theta \cot(n\theta + \varphi)$$

$$r_n = \sqrt{(A_n \sin \theta)^2 + \{A_n \sin \theta \cot(n\theta + \varphi)\}^2}$$

r_n の光軸部分

$$r_{n \text{ AXIS}} = r_n \cos\left(n\theta + \varphi - \frac{\theta}{2}\right)$$

これらの式に A_1 と θ の初期値を与え φ をパラメータとして、入射光の光軸成分侵入距離を計算し図および表にした。この計算において、1回の反射で光軸成分が10mm以下になった時計算を打切った。

図2は頂角 $\theta=8^\circ$ 、 $A_1=650$ mm、図3は $\theta=10^\circ$ 、 $A_1=650$ mmの場合である。また受光面を開口面から

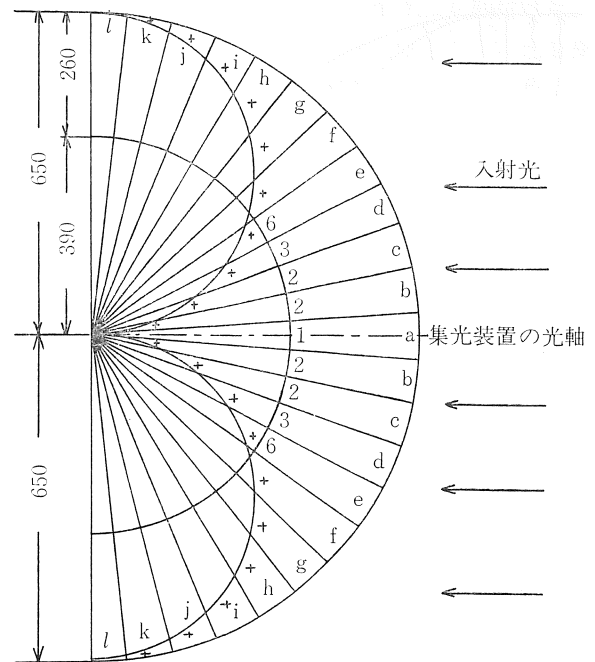

 図2 入射光の侵入距離
(頂角 $\theta=8^\circ$ 、 $A_1=650$ mmの場合)

 表1 軸成分侵入距離および反射回数
(頂角 $\theta=8^\circ$ 、 $A_1=650$ mmの場合)

セル記号	軸成分侵入距離	受光面までの反射回数
a	591 mm	1
b	510	2
c	425	2
d	335	3
e	265	6
f	198	到達しない
g	137	到達しない
h	87	到達しない
i	47	到達しない
j	19	到達しない
k	3	到達しない
l	0	到達しない

260mmの所に設定した場合、受光面に到達するまでに要する反射回数を図2、図3と表1、表2に示した。これらの図から、入射光は球状集光装置の半径 A_1 を直径とする円周付近まで侵入する。受光面を図のどこに設定するかによって、集光装置の許容偏角が決まる。集光比を大きくすれば許容偏角は小さく、集光比を小さくすれば許容偏角は大きくなる。また、この両図から集光装置としての許容偏角は $\theta=8^\circ$ の場合 36° 、 $\theta=10^\circ$ の場合 35° である。頂角を小さくした方が装置全体としての許容偏角が大きくなる。この解析を参考にして、集光セルの形状を図4のように決定した。開口部は1辺113mmの正三角形、受

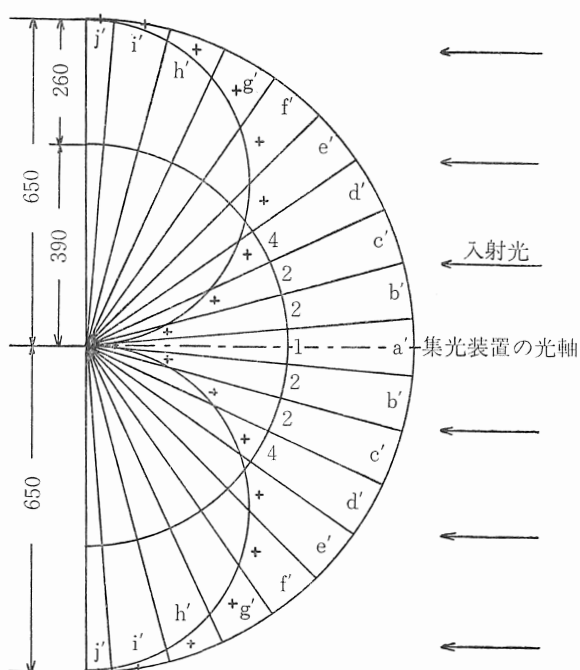


図3 入射光の侵入距離
(頂角 $\theta=10^\circ$, $A_1=650$ mm の場合)

表2 軸成分侵入距離および反射回数
(頂角 $\theta=10^\circ$, $A_1=650$ mm の場合)

セル記号	軸成分侵入距離	受光面までの反射回数
a'	585 mm	1
b'	479	2
c'	373	2
d'	275	4
e'	188	到達しない
f'	115	到達しない
g'	58	到達しない
h'	20	到達しない
i'	0	到達しない
j'	0	到達しない

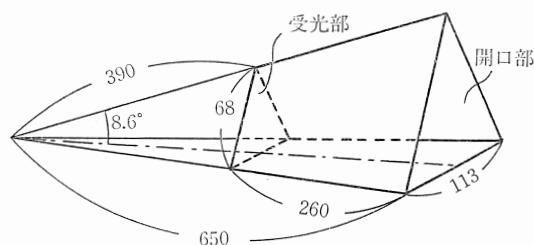


図4 集光セルの形状

光部は1辺68mmの正三角形で、筒の長さは260mmである。この際の集光比は2.76である。また、底辺の中央と三角形の頂点のなす角は 8.6° である。この集光セルでは入射光はスパイラルに反射をくり返して侵入して行くため、前述の解析より侵入距離は若干小さく考えられる。

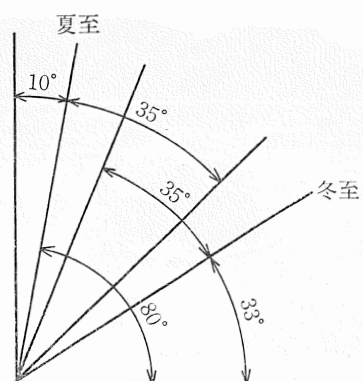


図5 太陽高度と許容偏角

2.2 集光セルの反射鏡

加工を容易にするために、中井金糸工業製の農業用反射フィルムを台紙に貼り使用した。これはポリエステルフィルムに裏面からアルミニウムを蒸着し、その上をポリエステルフィルムで保護したものであり厚さは $50\mu\text{m}$ である。このフィルムは温室における夜間の熱副射を防ぐためのもので、太陽光に対する反射率は0.8程度である。表1、表2に示したように、受光面に到達するまでの反射回数は偏角が大きい集光セル程大きくなる。入射光はこの反射率の n 乗で減衰するため、反射率の大小は大きな問題である。

2.3 集光装置の製作

写真1のような四分の一の球にするため、集光セルを上下 90° 、東西 180° に受光面同士、開口面同士を寄せ集めて積み上げた。集光装置の大きさは東西1.3m、高さ65cmである。計算値および実測から、この装置の許容偏角は約 35° である。冬至における太陽高度を 33° と考えると図5のように冬の光は集光装置によって充分受光できる。しかし、夏至の太陽高度を 80° と考えると、許容偏角内の光を受光できない部分が生ずる。集光セルを 90° 以上に配置すれば夏でも集光可能であるが、光を受けない部分が増し効率が低下する。よって 90° に設計した。夏に効率を上げるためには、装置を後方に 30° 程度傾ければよい。

2.4 集光装置の活性受光面積

直達日射に対して、集光装置上の集光セルが全て活性というわけではない。すなわち、集光装置の許容偏角内の集光セルに入射した光のみが受光面に到達する。本集光装置の許容偏角は約 35° であり、半径 $A_1=65$ cmであるから、集光装置の表面において入射光に直角な活性受光面積は次のように表される。

$$\text{半径 } r = 65 \sin 35^\circ \approx 37.3 \text{ cm}$$

$$\text{活性受光面積 } S = \pi r^2 = 0.44 \text{ m}^2$$

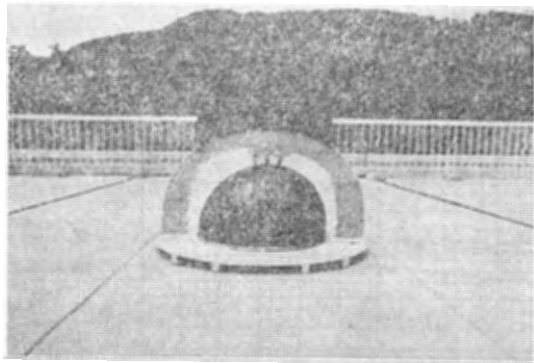


写真2 受熱器と保温タンク

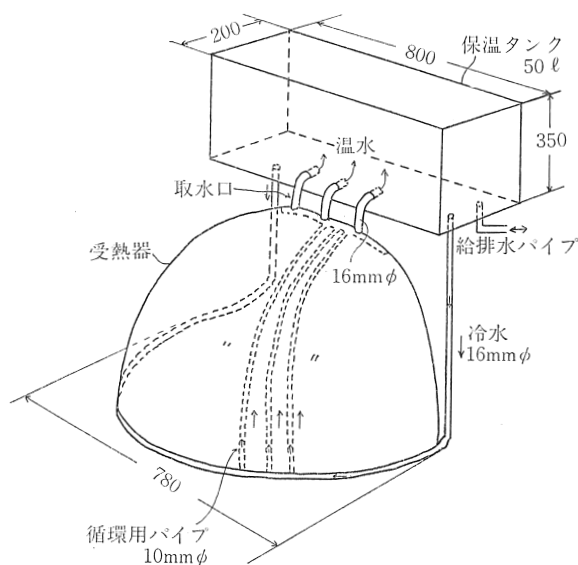


図6 受熱器と保温タンク

この活性受光面積は、集光装置の全表面積が 1.3m^2 であるから33%にしか過ぎない。実際に入射する光は直達日射のみではなく、散乱光による入射が10%程度あり他の集光セルも多少役立っている。

3. 受熱器

受熱器の形状は集光装置の受光面と一致させるため、半径39cmの四分の一球になるように製作した。前述のように集光装置の活性領域が東から西へと移動する。このため、受熱器が加熱される部分とそうでない部分が生ずる。この両部分の水が熱循環を起したのでは高い温度を得ることはできない。これを防ぐために、活性領域のみで熱循環が起る構造とした。すなわち、写真2及び図6に示すように、受熱器の下部に冷水の給水口を2箇所、上部には温水の取水口を3箇所もうけ、加熱された熱が他に拡散しないうちに自然循環によって保温タンクへ送られるように設計した。給水パイプには16mmφの銅パイプを使用し、これに27箇所穴を開け循環用の10mmφの銅パイプを立てた。そして上部で再び16mmφのパイプに接続し、

このパイプの3箇所16mmφの取水口を取付けた。これらの循環パイプの表面には集光装置からの光を受けられるように0.6mm厚の銅板をハンダ付し表面をつや消しラッカスプレーで塗装した。そして裏面は、厚さ10mmの発泡スチロール板で保温した。この受熱器の重量は9kgである。

4. 温水器としての構成

写真2に示すように、熱循環が起るように厚さ0.6mmの亜鉛引銅板でできた容量50ℓの保温タンクを受熱器の上部へ配置した。保温タンクの容量を50ℓにした理由は、一般の温水器の受光面積が約 2m^2 で200ℓの容量を持っており、この四分の一の規模を目標としたからである。このタンクの底から受熱器の給水パイプに冷水を供給すると、暖められた水は受熱器の上部3箇所の取水口から保温タンクへ送り込まれる。これを保温するために厚さ20mmの発泡スチロール板でタンクをおおい、厚さ10mmの合板でタンクや受熱器を格納した。そしてこれらの前面に前述の集光装置を写真1のように置き、集光形の温水器を構成した。放熱を防ぐため集光装置の前面は厚さ0.6mmの農業用透明ビニールでおおった。

5. 特性の測定

温水器を南向に設置し、50ℓの水をタンクに注入する。銅コンスタンタンの熱電対を用いて3箇所の取水口の温度および受熱器中央部、保温タンク内中央の水温と外気温を測定した。測定は午前6時から午後6時まで行った。図7に加熱特性を示す。取水口が隣接しているため、各取水口に大きな温度差はないが温度の遷移がわかる。また、受熱器中央部よりその上部の取水口の温度が 10°C 程度低いのは、熱伝導あるいは対流によって熱が拡散したからである。

また次に、水を注入しない場合受熱器の温度が集光装置によってどの程度上昇するかを知るために、無負荷特性を測定してみた。測定点は受熱器中段の東南西の3箇所と外気温である。測定値を図8に示す。特性から加熱部分が東南西へと時間と共に移動していることがわかる。受熱器の温度は午前9時から午後3時まではいずれかの部分が 100°C を起えており、最高 110°C に達している。

6. 考察

6.1 集光装置の考察

平板形温水器と集光形温水器を比較した時、同一受

測定日 昭和56年7月18日 天候 晴
 1…受熱器中段南側の温度 4…西取水口の温度
 2…東取水口の温度 5…保温タンク内の水温
 3…南取水口の温度 6…外気温

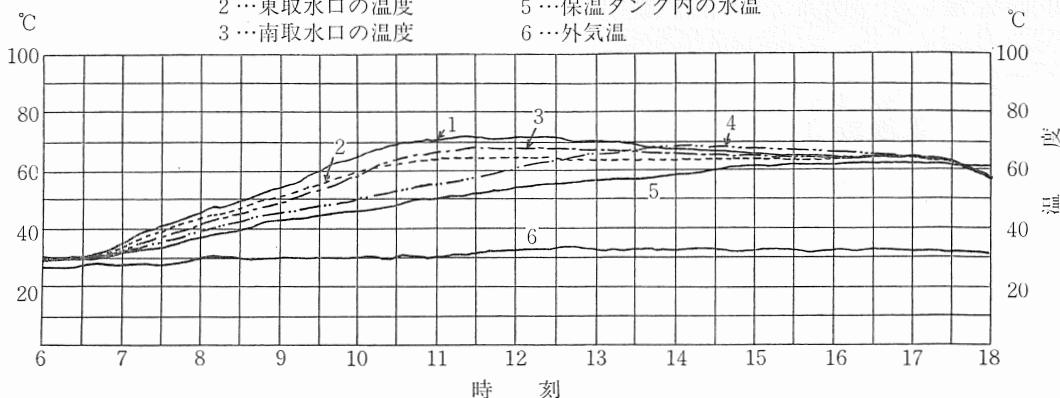


図 7 加 熱 特 性

測定日 昭和56年7月26日 天候 晴時々くもり
 1…受熱器中段東側の表面温度 3…受熱器中段西側の表面温度
 2…受熱器中段南側の表面温度 4…外気温

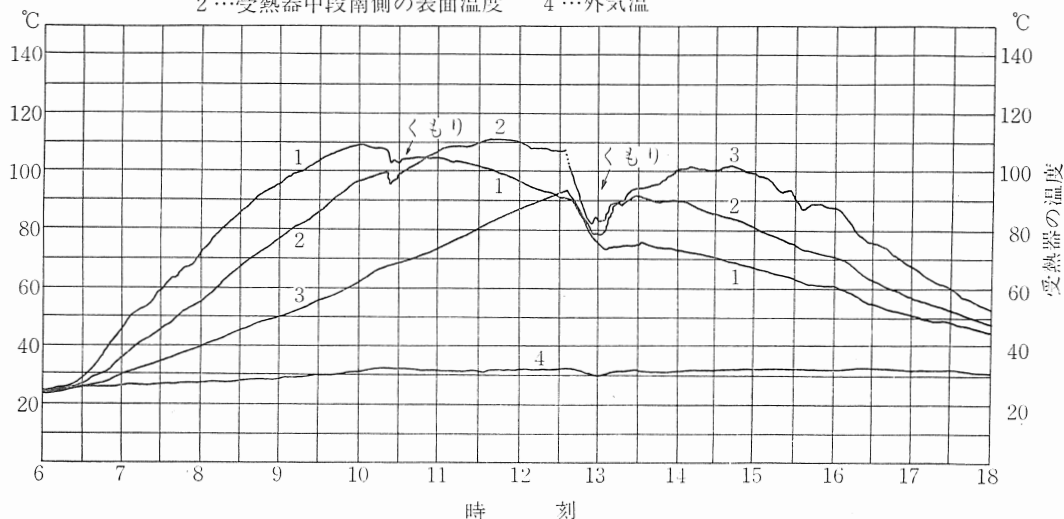


図 8 無 負 荷 特 性

光面積であるならば、平板形の方が集光による減衰が無いだけ入射エネルギーは大きい。しかし平板形においては、受熱器に対して入射するエネルギーと副射あるいは熱伝導によって出て行くエネルギーとが低いエネルギー状態で平衡する。したがって、到達温度には限度がある。この平衡状態をより高い所に設定しようというのが集光形の温水器である。集光形の利点は、同一水量では、平板形の受光面積を広くするよりも、集光形の受光面積を広くする方が到達温度を高くできること、または、同一受光面積で水量を減らし高い温度が得られることにある。現実問題として一般家庭用の温水器の水量は 200 l 程度を必要とし、この水を平板形より高い温度にするためには平板形の受光面積以上にする必要がある。本装置の活性受光面積が 0.44 m² であるため、実用に供するためには装置を大きく

し活性受光面積を大きくする必要がある。今回の試作においては集光比を 2.76 に設計しているが、この集光比を小さくし活性受光面積を大きくする必要がある。しかし、あまり集光比を小さくしたのでは集光の本来の意味が無くなる。反射鏡に反射率の大きいものを使用し、途中でのエネルギー損失をできるだけ小さくし、集光比は 1.5~2²⁾ 程度とするのがよいと考える。

この他にこの集光装置は直達日射を常に追尾するために、活性受光面積に関しては、固定平板形の受光面が受ける日間積分日射の 1.2²⁾ 倍程度の入射エネルギーを得ることができる。

6. 2 受熱器の考察

特性から、受光している受熱器の温度が約 70° と必

要以上に高い。これは今回使用した循環用パイプの径が小さすぎ、加熱された際管の内側に気泡が付着して壁面抵抗が増大し、十分な熱循環が起きていないためと考えられる。循環パイプを太くして十分な熱循環を起し吸収した熱をすみやかに保温タンクに送り、受光面の温度を下げ常に入射エネルギーとの間にエネルギー勾配を付けておく必要がある。

つぎに、本装置の特徴である部分的に熱循環が起きているかどうかであるが、無負荷特性によれば、受熱器の温度が受光している部分とそうでない部分では50℃程度の差があり、受光部分を介して熱循環が起きていることは明かと考える。

6. 3 温水器の考察

温水器の最高到達温度は62℃であったが、集光セルに使用した反射フィルムの反射率が大きくないこと、また反射面がたるむなどして正確な反射面を構成できなかったことに最大の原因がある。反射面にガラスの鏡あるいは金属をメッキしたもの、プラスチックメタライジング⁷⁾技術を使う等して反射面の改善を計る必要がある。また、受熱器の改良によってより高い温度が得られると考える。

7. 結 言

本論文の目的は、集光方式の提案とこれを用いた温水器の実現性を述べることにあった。最高到達温度に関しては、従来の平板形より高い温度を示すことができなかった。しかし、無負荷状態においては110℃を

起えており、今後集光比の最適化、あるいは良好な反射鏡による集光装置の製作、また受熱器の構造や受熱器の塗料の選択、保温等に配慮すれば、従来の温水器より高い温度が得られると考えられる。

最後に、本研究に対してご支援をいただいた本校機械電気工学科前園一郎助教授に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) 押田勇雄：リニアフレネルレンズを用いた集光型集熱器 SOPHIA No.3 について、日本太陽エネルギー学会、第7回研究発表会講演論文集 (1981)
- (2) 太陽エネルギーの基礎と応用、日本太陽エネルギー学会編、p.35-45, p.289-292. (1978)
- (3) 田中俊六：太陽熱冷暖房システム、オーム社、p.65-66 (1977)
- (4) 藤村紀明：簡易構造の集光形集熱器の提案とその制御方式、太陽エネルギー、Vol.7 No.2 通巻25, p.31-36, (1981)
- (5) 生沼利亮：太陽追尾の方法について、太陽エネルギー、Vol.4 No.4 通巻15, p.14-19, (1978)
- (6) 太陽エネルギー読本、日本太陽エネルギー学会、p.65, (1975)
- (7) 友野理平：プラスチックメタライジング、オーム社、(1978)

(昭和57年3月11日原稿受理)