
フレネルレンズを用いた太陽エネルギー利用装置

Utilization of solar energy by linear Fresnel lenses

代表研究者 上智大学理工学部教授 押田 勇雄
Prof., Faculty of Sci. and Tech., Sophia Univ. Isao OSIDA

協同研究者 上智大学理工学部教授 岡村 秀勇
Prof., Faculty of Sci. and Tech., Sophia Univ. Hideo OKAMURA

Two types of focusing solar collectors and a solar distillator, all using linear Fresnel lens were constructed and tested.

The solar collectors are Model 1 and Model 3. Model 1 is a large, roof-shaped one. The length is 210.5 cm and the width at the base 240 cm, and the height 170 cm. A set of linear Fresnel lenses of the total area of 2.1 square meters is equipped on the south side of the 45-degree tapered roof. A refracting metal surface is put on the bottom and a set of hot boxes are attached near the top inside so as to receive the reflected beams. A clear day the temperature of one of the hot box reached 104°C without water as the heating medium inside.

Model 3 gave better results. It has 12 smaller lenses of 30 cm×30 cm each. According to the experiments on clear days, the outlet temperature of the heating medium, that is, aqueous solution of ethyleneglycol, reached sometimes 110°C or more higher than the inlet temperature. This type will fit to operate an adsorption chiller for space cooling.

The solar distillator, named Sophia Model No. 2, has a large linear Fresnel lens of 60 cm×160 cm. In the cold season of from the end of February to the beginning of March, distilled water of about 2 liters per day was obtained. Although the figure is not satisfactory, there adopted some new ideas, that is, the use of fan to accerelate the evapolation and to guide the evaporated moisture to the condensor, and the heat of condensation liberated there being used to pre-heat the water to be distilled, are seems to be successful.

Another plan of constructing a solar generator that develops 0.75 kW was not completed and now continued to construct at the department of mechanical engineering, Sophia University.

研究目的

フレネルレンズが太陽エネルギーの利用に対し、非常に有効なことは古くから知られており、代表研究者もフレネルレンズの有用性について、20年来指摘し推奨してきたところである。

しかしながら、太陽エネルギーの利用に役立つような、大型のフレネルレンズについては、他にこれといった用途もなく、これを試作しようという奇妙なメーカーも現れず、その有用性を実験によって立証しようと思っても、これまでほとんど

不可能であった。この事情は諸外国でも同様とみえて、フレネルレンズの大型のものを使用した実験の論文数はきわめて乏しいものである。

とくに、円柱レンズや放物柱面鏡と同様の働きを持つリニャー・フレネルレンズについては、その傾向が著しい。

ところが、ここ数年の間に、少数ではあるが高い技術を持つ積極的なメーカーが現れ、それらのメーカーの厚意により、大型のリニャー・フレネルレンズの提供を受けられることになった。ま

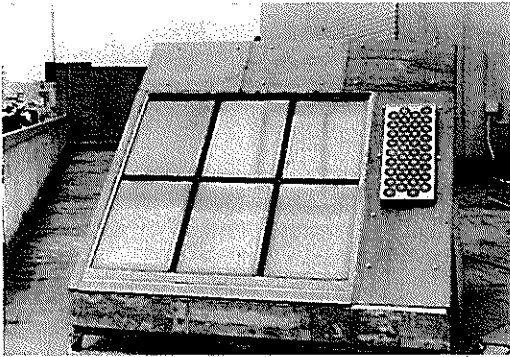


写真 1. ソフィア 1号

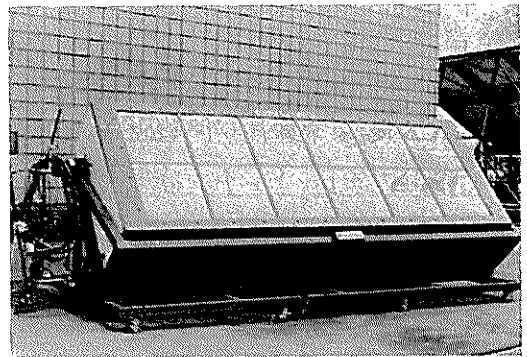


写真 3. ソフィア 3号

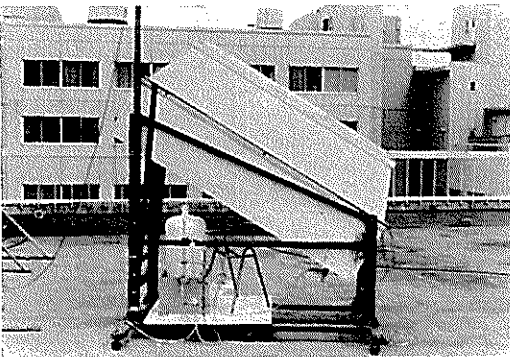


写真 2. ソフィア 2号

た、代表研究者は 1976 年以來、新しいエクセルギー理論による太陽エネルギー利用システムを研究しつつあり、ここにこの両者を結合した集光型集熱器、太陽熱蒸留器などの機器の開発研究を行なうのが本研究の目的である。

研究経過

1. 概説一試作機器の選定

我々は、次の四つを試作機器として選定した。
 集光型集熱器—ソフィア 1号
 太陽熱蒸留器—ソフィア 2号
 集光型集熱器—ソフィア 3号
 太陽熱発電機—ソフィア 4号

以下、それぞれに分けて研究経過を報告する。

2. 集光型集熱器ソフィア 1号

ソフィア 1号は、すでに我々が 1977 年春作りあげ、その後引き続き実験してきた屋根型集熱器ソフィア 0号の延長線上にあるもので、主に異なる点は、熱対流を考え、第 2 集熱器（我々は小屋

自体を第 1 の集熱器とみなすので、その内部に設置する小型の集熱器を第 2 集熱器と呼ぶ）を、内部の上辺近く下向きに置くことにした。それに従って、窓を構成するリニヤー・フレネルレンズから入射する日光を、床面近くに位置する曲面反射板で反射させる必要を生じる。この場合、集熱器を下向きに置くこととなるが、この型式のいわゆる逆平板型集熱器については、すでに工業技術院電子技術総合研究所の作田宏一氏が実験して好結果を得ておられるので、それにならうことにした。ただし作田氏の場合は集光面積と集熱器の面積とは等しく、集光効果はないものとみられ、その点、本集熱器はリニヤー・フレネルレンズと曲面反射板による二重の集光作用を持つため、より高温度が得られると期待される。

全体の構造は断面が二等辺三角形の屋根型で、そのまま一般住宅の屋根および屋根裏部屋の有効利用として転用できることを狙った。

図 1 はその断面の略図で、屋根面は水平と 45 度をなし、南に向けて置く。東西長さは 210.5 cm である。骨組み鉄骨フレーム構造とし、壁面は主としてベニヤ合板で、必要な場所に断熱材、ゴム、FRP などを使用した。

リニヤー・フレネルレンズは、ソフィア 0号に使用したものをそのまま転用した。(株)ユープの矢田部善雄氏の御好意により提供を受けたもので、大きさ 70 cm × 50 cm のもの 6 片からなり、合わせて総面積 2.1 m²、長さ 150 cm、幅 140 cm、焦点距離 160 cm のリニヤー・フレネルレ

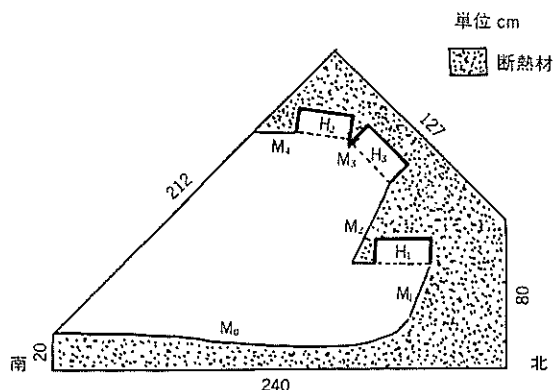


図 1. ソフィア No. 1 南北断面図
 H: 第 2 集熱器 (H₁ 冬用, H₂ 夏用, H₃ 春秋用)
 M: 反射面 (M₀ 主反射面)

ルレンズを構成する。

内部の反射板は、ステンレス鋼板を曲げ、木枠に木ネジで固定した。曲面の形は最も苦心を要するところで、でき得れば年間を通じて、正午の前後 2 時間ほど第二集熱器の上に焦線を結ぶことが望ましいが、太陽の年間の動きが大きき、それは不可能であった。最終的には、電子計算機による光線追跡に基づいて、最適と考えられる三次式を断面の曲線として採用したが、それでも第 2 集熱器は 1 個で間に合わず、同じものを夏季用は上部に、冬季用は内部北寄り (奥の方) に、そして春秋用をその中間に置く (図 1) 羽目になった。

なお、これらの第 2 集熱器の間と、内部の側面 (東面および西面) にもステンレス鋼の反射板をつけ、太陽の方向にかかわらず、できるだけ第 2 集熱器の方へ光線を入れるようにした。

作業は松本啓樹君 (研究生) 以下、上智大学工学部物理学科四年生 (当時) 細川 昇君、飯田守君、川上英一郎君、前山文明君の合せて 5 名がこれに当たって、上智大学 4 号館屋上で行なわれた。

3. 太陽熱蒸留器ソフィア 2 号

我々が、太陽熱蒸留器をこの際試作したいと考えた理由は、勿論、世界的な水不足の傾向を第一に挙げなければならない。第二には、集光型の蒸留器の研究はこれまでほとんど行なわれておらず、ましてフレネルレンズを使用したものは皆無

であるから、ぜひ太陽熱蒸留器への大型フレネルレンズの適用の可能性を探究してみたかったのである。

採用した太陽熱蒸留器の型 (タイプ) は、傾斜ウィック型と呼ばれるもので、別段新しいものではない。しかし、次のような新しい工夫を採用している。(A) リニヤー・フレネルレンズの使用によって、ウィック (蒸発面) 上に焦線をつくり、線状の高温度の部分 (水の沸点 100°C を越える) をつくり出すことによって、全体としても蒸発速度を速める。(B) 太陽熱で蒸発した水蒸気が凝縮して再び水になる面 (金属) の裏側に、これから蒸留しようとする海水を通し、蒸発熱の一部を、海水の予熱のための熱として回収を計ったこと。(C) 蒸発面にファンで強制送風し、蒸発速度を速めたこと。このファンの動力は、最終的には太陽電池で発電した電力によることとすれば、全体としても完全に太陽エネルギーを使った蒸発プロセスで一貫できるので問題はない。

使用したリニヤー・フレネルレンズは、(株) 国城金型製のもので、同社の社長平松 保氏の御好意により提供していただいたものである。射出成型により作られたアクリル樹脂製で、大きさは長さ 160 cm、幅 60 cm、焦点距離 60 cm、平板でなくふくらみを持たせてある点が機械的強度保持のため、および結露の良さのため好都合である。

このリニヤー・フレネルレンズは、焦線が長さ

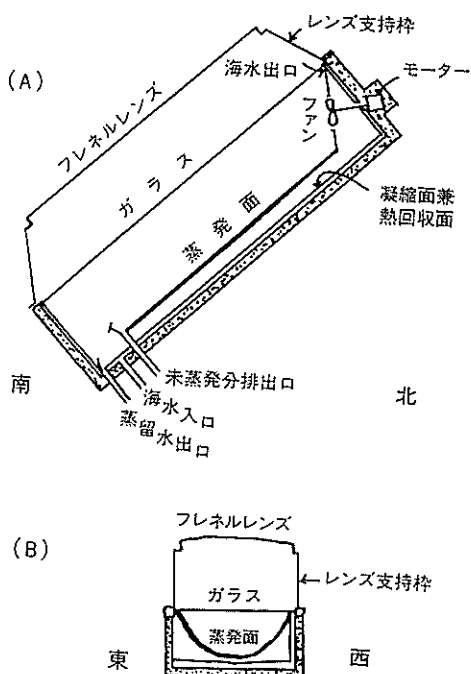


図 2. ソフィア 2 号断面図
(A): 南北断面; (B): 東西断面

の方向に沿ってできる。その関係でいわゆる南北位、すなわち北から南へ長さの方向を向け、南に傾けて置くように設計した。なおこの装置の水平面に対する傾角は、実験実施時期の太陽の南中時の高度に合わせて 44 度にした。この傾角は連続的ではないが可変である。

装置の概略の構造と、作動原理を図 2 によって説明しよう。リニヤー・フレネルレンズによってつくられた太陽エネルギーの集中部分である焦線は、半径 30 cm の曲率を持たせた、蒸発表面積約 1.7 m² のステンレス鋼製厚さ 0.6 mm の蒸発面に落ちる。太陽に正対したあたりで、焦線の幅は約 1.5 cm であった。(したがって、集光比は約 40 倍となる)。蒸発面の表面には黒色のカーテン布を貼り、裏面は発泡スチレンで断熱した。

蒸発した水蒸気は小さなファンで吸引し、断熱面の下の熱回収面に導く。熱回収面は凝縮の起こるところで、水蒸気の凝縮でできた水滴は、この面を伝わって降下し、蒸留水出口から採取される。

凝縮の際放出される熱エネルギーを回収するため、熱回収面の下面に沿って、これから蒸留しようとする水(海水、鹹水など)を通して上方の海水供給口から少量ずつ出す。このため 8 W のマグネットポンプを使用した。

製作には若林正浩君(昭和 54 年 3 月卒業)をリーダーとして、上智大学物理学科四年生(当時)矢津田舟二君、市瀬信治君、松尾禎介君の 4 名が主として当たった。

4. 集光型集熱器ソフィア 3 号

集光型集熱器に共通する最大の難点は追尾(動く太陽を追って装置を動かすこと)である。それが実用化されるためには、まずこの問題を解決しなければならない。

本研究では、できるだけ無集光型の平板型集熱器と同様、固定して使うことのできる集熱器をめざした。もちろん、年 3~4 回の季節による傾角調整が、最適使用のためには必要となるので、問題は全く解決したわけではない。しかし、今回幸にして、比較的小型のリニヤー・フレネルレンズを入手でき、それを利用したことと、集熱板分割という新しい方式を案出・採用したことにより、期待に近い成績を得、集光型集熱器の実用化を一歩進めたものと考えている。

使用したリニヤー・フレネルレンズは(株)信興エンジニアリング製で、社長梅本恭治氏の御好意により提供されたものであり、1枚の大きさは 30 cm × 30 cm、焦点距離は 21 cm である。このものを 6 枚ずつ 2 段(計 12 枚)横に並べ、1.1 m² の受光面をつくる。

焦線(2本できる)の所に銅製、黒色に塗った集熱面を置くが、この集熱面はわざわざ長さの方向に二つに分割してある。そして、それぞれの分割された集熱面の下面に熱媒体の通るパイプを溶接した。

このような構造をとる理由を説明しよう。太陽の動きのうち、東から西への運動に対しては、この種の、リニヤー・フレネルレンズを東西位に置く方式では、平板型の(無集光)集熱器と事情は同じことである。問題は年周運動、すなわち太陽の南中高度が季節によって変化することに対する

対応である。

平板型では、この変化に対して比較的鈍感で、余弦法則から、一年中の変化はわずかプラス・マイナス 8~9% 程度である。しかし、集光型は集光倍率に比例して、方向変化に敏感になり、ここが固定して使う場合の泣きどころとなる。

これに対応するため、幅広い集熱板を使い、少々焦線が動いても焦線が集熱板からはみ出さないようにすることはできる。しかし、これでは、折角の集光倍率が、集熱板の幅に比例して低下したと同じことになり、何のために集光したかわからなくなる。

そこで、この幅の広い集熱板を、長さの方向に沿って縦割りに二つにする。そして、焦線の当たっていない方の集熱板を、熱媒体予熱用として使い、これを通していくらか温度の上った熱媒体を、改めて焦線の当たっている方の集熱板の下を通して、さらに温度を引き上げる。

この方法は、今回代表研究者の案出したもので、かりに“集熱板分割方式”と呼んでおこう。ソフィア 3号はこの方式を採用している。

装置の実際の製作には、上智大学理工学部物理学科四年生（当時）笠間健次君をリーダーとし、一木 茂君、巽 一幸君の計 3名が当った。

5. 太陽熱発電機ソフィア 4号

当初の計画に含まれていたものの一つは、大型リニヤー・フレネルレンズを使用した小規模熱発電装置である。

計画では出力 0.75 kW の小型フレオンタービンを使用、これに必要なエネルギーを大型フレネルレンズで獲得する。

使うリニヤー・フレネルレンズは、(株)信興エンジニアリングで造られたもので、1枚の大きさが 1m×1m、2枚1組で焦線方向の長さ 1m、幅 2m のリニヤー・フレネルレンズを構成し、その焦点距離は 140 cm である。このものを 3組、集光面積 6m² のものを構築する予定でスタートした。

装置の製作には、上智大学機械工学科の学生（大学院生および四年生—当時）の手をわずらわせた。

研究成果

1. 概説

以上、四種の機器—ソフィア 1号から 4号まで一をほとんど時期を同じくして製作を進めることとなり、研究室の総力を挙げて取り組んだが、最も気がかりであったことは、大型フレネルレンズの入手時期が、諸般の事情により、大幅に遅れ、製作過程の大部分が第 2年度（昭和 54 年度）にずれ込み、所定の研究終了時である昭和 55 年 3 月末に間に合わないことであった。

幸にして、レンズ供給者、協同研究者、学生諸君、これらの方々の御協力を得て、最初に予定した計画の大部分を遂行することができた。以下に示すように、それぞれの機器について、十分とはいえないまでも、若干の測定結果を得て、リニヤー・フレネルレンズ利用の太陽エネルギー機器について、多くの参考になる有益なデータが得られた。とくに、ソフィア 2号および 3号については、新しい試みのいくつかについて、これを肯定する方向の結果が得られたことは、大きな成果といえよう。

ただ、残念なことは、ソフィア 4号については、建設途中で期限が切れ、同時に助成金も全部出払ってしまうという事態になった。これについても、その後も引き続き別途の研究費により研究が行なわれており、いずれ発表の機会もあるものと考えている。

2. 集光型集熱器—ソフィア 1号

写真 1 はソフィア 1号の完成した姿を示す。ソフィア 1号については、工作に手間どり、その完成が第 2年度の終りに近くなったため、数多くのデータを得ることができなかつたのは、誠に残念である。

昭和 55 年 3 月 10 日から 13 日まで、いわゆる空吹き実験—熱媒体である水を流さず、配管内に空気が満ちている状態での実験—では、内部に置いた春秋用の第二集熱器内の温度は、午後 1 時前後には 100°C を越える（好条件の場合）。たとえば 3 月 13 日は天候は晴れで、最大日射量は 1.4 cal/m²·min であって、春秋用の中部集熱器内の集熱板の温度は 12 時 45 分に 104°C に達した。

しかし、集光型集熱器の成績としてこれを見ると、満足のいくものではない。その原因はいろいろあろうが、下部反射板の反射率が低く、またフレネルレンズと曲面反射板の組合せが、この場合、主としてフレネルレンズの焦点距離が与えられてしまっていることにより、あまり適合性がよくなく、フレネルレンズを通った光線のうち、十分大きな部分が、所定の第2熱箱に入っていないのが、最も大きな原因と思われる。また、第1熱箱である全体の熱容量も大きすぎるようである。

3. 太陽熱蒸留器ソフィア3号

写真2は完成したソフィア3号を示す。これを用いた実験が昭和55年2月下旬から3月上旬にかけて、上智大学第4号館屋上で行なわれた。

試料としては、本来ならば少なくとも人工海水を使用すべきところであるが、今回はとりあえず水道水を使用した。したがって、海水を使用した場合は、少しばかり今回の成績を下回る結果が出ることも考慮に入れなければならない。

実験は注入する未蒸留水の流量が一定になったところで、日射を導き入れ、日射量、未蒸留水流量、得られた蒸留水の量(30分おきにメスシリンダーで測る)、蒸発面温度、蒸気温度(熱回収面への入口と出口)、未蒸留水入口温度、未蒸留水出口温度(蒸発面へ導かれる未蒸留水の温度)、蒸発面を覆うガラス面の内側の温度、蒸留されずに残って出てくる未蒸留水の温度、気温の同時測定を行なった。

1日を通じて得られる蒸留水の量は、晴れた日で2kg(2l)内外で、太陽熱蒸留器とそのものの総合性能としてはあまり良くない(6l/日はほしいところである)。その原因はいろいろあろうが、南北位に置いた集光型装置の共通点として、正午近くにならないと性能が十分発揮されないことが最大のものであろう。その証拠には、午前10時ごろからようやく盛んに蒸留水がとれ始める。

それにもかかわらず、この新しい試みの太陽熱蒸留器の利点もまたいろいろ見いだされた。たとえば、一般の太陽熱蒸留器に見られるガラス面内側の水滴付着がほとんど見られない。これはフ

ンにより、飽和水蒸気がうまく引き出され、凝縮面(熱回収面)で所期のごとく凝縮していることを示すものと考えられる。

熱回収の効果も見られる。通常の太陽熱蒸留器では、日没以後ほとんど全く蒸留水を得ることができないのに、ソフィア2号では夜間に至っても50~100ccの少量ではあるが、蒸留水が得られた。

このように、総合効率にはまだ改良の余地が多いが、今回の新しい試みであるファンの使用と、熱回収プロセスの導入については、これを積極的に支持する方向の結果が得られたと思う。これらは、今後の太陽熱蒸留器の進むべき方向に、有益な示唆を与える。

4. 集光型集熱器ソフィア3号

写真3は完成したソフィア3号を前面から見たところである。

熱媒体としては、100°Cで沸騰する水は使えないので、水とエチレングリコールの混液を使用した。昭和55年2月9日から同18日までの間に行なった実験結果を要約すると、次のようである。

集熱板分割方式の有効性が明らかになったこと。

焦線の当たっていない方の集熱板でまず熱媒体を予熱し、その後、予熱された熱媒体を焦線の当たっている方の集熱板を通せば、高い到達温度が得られるが、この順序を逆にすると、到達温度はかなり低くなる。このことからみて、集熱板分割方式は、有効に働いていると結論できる。

平板型(無集光)集熱器より高い温度が得られること。

集熱器の集熱特性を表わす一般的な方法として、横軸に出口水温と入口水温との差を日射量で割ったものを取り、縦軸に集熱効率をとったグラフを書いてみると、実験結果は予期されたようにはぼ一直線の付近に集まる。この直線は、通常1枚のガラスの平板型集熱器のものよりも、おおむね右側にあり、言い換えれば集熱温度を高くとることができる。この直線を延長すると、日射量が800W/m²のとき、最高到達温度は気温を上回ること

160°C に達する。もちろん、この温度で連続使用可能というのではなく、最適使用温度は気温以上約 80°C に止まる。これは最初に目標とした温度 120~130°C をやや下回るが、それでも、たとえば夏季冷房のために、吸収式冷凍機を働かすとして、気温が 30°C のとき、最適使用温度は 110°C となり、吸収式冷凍機を働かせるのに十分な温度である。

5. 太陽熱発電機ソフィア 4 号

総受光面積 6 m² を構成する 6 枚のフレネルレンズを支持する枠組みを、鉄アングルで造った。750 W のフレオンタービン、および付属機器はすでに発注し、目下テスト中である。この実験は現在続行中であって、本年度末に間に合わなかったことは、返すがえすも残念である。

今後の課題—実用をめざして

ソフィア 4 号を除き、ソフィア 1 号から 3 号まで、一応の成果を挙げたが、なお今後に持越された課題について要約しておく。

リニヤー・フレネルレンズを用いた集光型集熱器について、これだけの結果から早急に結論を出すのは軽率であるが、次のようなことは言えるのではなからうか。

ソフィア 3 号の方が 1 号より好結果が得られたということは、集熱器としては 30 cm 程度の一辺のやや小型のものの方が適しているということではなからうか。ソフィア 3 号は一応の成功と見てよく、到達温度も、黒色吸収面の代わりに選択吸収面を使用し、場合によっては真空層を採用することによって、さらに 20~30°C 上昇させることは、難しくないと思われされる。そうなれば、集光型の特徴はますます発揮され、用途もそれにつれて拡大されてゆくであろう。

蒸留器ソフィア 2 号については、総合的にみてまだかなり改良の余地がある。その方向としては、まず一日を通じてより多くの日射を受けられるよう、東西位とすること、蒸発を受けずに流下する水の量を減らすため、毛管現象を利用する方

式をとることなどである。なお実用化については、ポンプおよびファンの動力を太陽電池で供給することを考えなければならないが、そのためにも水平位に近い東西位をとり、毛管現象をできるだけ利用する方式がよいと思う。

謝 辞 長年暖めてきたリニヤー・フレネルレンズの太陽エネルギー利用への有効性を確かめる幾つかの実験のアイデア—これらを一挙に実行に移すことができた上、かずかずの貴重な結果を得ることができたことについては、実に多くの方々のお世話になったことを思わずにはいられない。

まず第 1 に、このたび助成金を交付して下さった日産科学振興財団に深く感謝する。また、外国でも得難い大型リニヤー・フレネルレンズを損得ぬきで製作、提供して下さった (株) ユーブの谷田部善雄氏、(株) 信興エンジニアリング社長梅本恭治氏、(株) 国城金型社長平松 保氏の各位に心からお礼を申し上げたい。装置の実際の製作を担当し、幾多の困難を自力で解決したり、ときには新しいアイデアを出してくれた上智大学工学部物理学科の、太陽エネルギー利用を卒業研究のテーマとして選んだ学生諸君にも、深く感謝して、本報告書の結びとする。

文献 (発表論文)

本研究に関連して発表した学術論文は次のとおりである。

- 1) 押田勇雄、岡村秀男: ソフィア・ソーラーハウス No. 0 (ゼロ) について、日本太陽エネルギー学会第 4 回研究発表会 (1978 年 11 月 27~28 日) 講演論文集, p. 33.
- 2) 押田勇雄: 「ソフィア・ソーラーハウス・ナンバーゼロ」について、サンシャイン (1979 年 9 号, 空調研究所 1979 年 7 月発行), p. 24.
- 3) 押田勇雄: 太陽エネルギー利用におけるエクセルギー概念の有用性, 日本太陽エネルギー学会第 5 回研究発表会 (1979 年 11 月 26~27 日) 講演論文集, p. 5.
- 4) 押田勇雄: リニヤー・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 6 回研究発表会講演 (1980 年 12 月 8~9 日) 講演論文集, p. 25.