

ソーラーレシーバーからの自然対流による熱損失

Free Convective Heat Loss from Cavity - type Solar Furnace

藤井石根*

Iwane FUJII

伊藤直樹*

Naoki ITOH

Abstract

As one of promising means for generating electricity from solar energy, solar Stirling engine system, whose performance is greatly influenced by performance of solar furnace, has gathered intensive attention together with photovoltaic power generation.

In this paper, investigation on free convective heat loss from cavity - type solar furnace is carried out experimentally using an apparatus imitating the furnace heated electrically. The testing results are arranged by correlation of Nusselt and Rayleigh numbers as usual to derive more normalized expression holding various physical effects such as furnace setting inclination, aperture size and so on.

Moreover, pictures showing air moving around and inside the cavity of the furnace help our insight on heat loss change brought by posture of the furnace.

Key words: Solar furnace, Free convection, Heat loss, Correlation of Nusselt and Rayleigh numbers, Visualization of air moving.

1. はじめに

地球環境問題の深刻化とそれに対する対策の必要性がこれまでしばしば論じられてきた。しかし、環境との調和を保ちつつ人類が生存していくためには、省エネルギーと省資源を積極的に推し進めることが必要であるが、加えて化石燃料に代わる新しいエネルギー資源やそのエネルギーを利用するシステム開発も必要である。そのような中で、最近、太陽エネルギーの利用に向け一般家庭向けの政府の資金援助等も徐々に整備されるなど、にわかに盛り上がりを見せている。しかも近年では半導体の高性能化に伴い、太陽光発電が太陽エネルギー利用技術上で一足先んじたかたちで商業化され、太陽光発電が太陽エ

ネルギー利用上の代表的なものの一つになっている。しかし、太陽熱発電についてもこれまで様々な研究が行われ、現在も所によってはなおも続けられている。とくに、太陽熱発電や熱化学反応器に関してはその性能の良否は同システムのボイラーに相当する部分、すなわちソーラーレシーバー部で得られる温度の高さによるところが少なくないため、そこでの熱損失に関する研究がこれまでに少なからず行われてきた^{[1]~[6]}。

しかし、提示されたこれらの結果はいずれも、条件の違いによる場合分けが多く、しかも各場合に対して整理式が提示されるなど、実用上面倒な処も少なくなかった。加えてレシーバー洞内径や深さ、それにアパーチャ部の径を変えるなどの処置が往々にして試されておらず、やや一般性に欠ける面もあった。

そこで筆者らは、太陽熱を熱源にして動力を得

原稿受付 平成9年4月4日

1996年度JSE/JWEA合同研究発表会で講演

*明治大学理工学部(〒214 川崎市多摩区東三田1-1-1)

る熱利用システムにおいて、そのシステムの効率を左右するソーラーレシーバーからの熱損失、すなわち自然対流による熱損失について研究を行ってきた^{7)~11)}。無論、熱エネルギーを他のエネルギーに変換する際の熱効率の大きさは熱源温度に大きく依存するため、例えばソーラースターリングエンジンシステムでもその性能の良否はソーラーレシーバーで得られる温度の高低によるところが極めて大きい。そこで、ここでもレシーバーからの自然対流による熱損失をできるだけ少なくすることを目的に、具体的には太陽仰角の変化に伴うレシーバーの姿勢、レシーバー蓋部にある太陽光入射孔（アパーチャ部）の径、およびレシーバーの空洞深さをそれぞれ変化させた際のレシーバー洞内部での空気の流れによる熱伝達を実験的に調べ、これに関して、これまで著者らが提示してきた物よりも一般的で、条件による場合分けのない実験式の導出を試みている。また、これに付随してレシーバー洞内部の空気流の可視化実験も行い、その流れの変化の様子を通じてここでの熱伝達がレシーバーの姿勢によってどのように変化するかを洞察するために役立てている。

記号表

a_1, a_2 : (7)式、もしくは(8)式によって与えられる定数

c_1, c_2 : (7)式、もしくは(8)式によって与えられる定数
 d : アパーチャ部の径(m)
 D : レシーバー内径(m)
 g : 重力加速度(m/s^2)
 $\bar{h}$: レシーバー内壁表面での平均熱伝達率(W/m^2K)
 k_1, k_2 : (7)式、もしくは(8)式によって与えられる定数
 ℓ : 代表長さ(m)
 L : レシーバーの深さ(m)
 q : ヒーターによる加熱面での平均熱流束(W/m^2)
 T_w : レシーバー洞内の壁面平均温度(K)
 T_∞ : 外気温度(K)
 ΔT : $T_w - T_\infty$ (K)
 α_1, α_2 : (7)式、もしくは(8)式によって与えられる定数(°)
 β : 空気の体膨張係数(K^{-1})
 θ : レシーバー傾き角度(°)
 κ : 空気の熱拡散率(m^2/s)
 λ : 空気の熱伝導率($W/m \cdot K$)
 ν : 空気の動粘度(m^2/s)
 $\overline{Nu}$: 平均ヌセルト数
 Ra : レイリー数

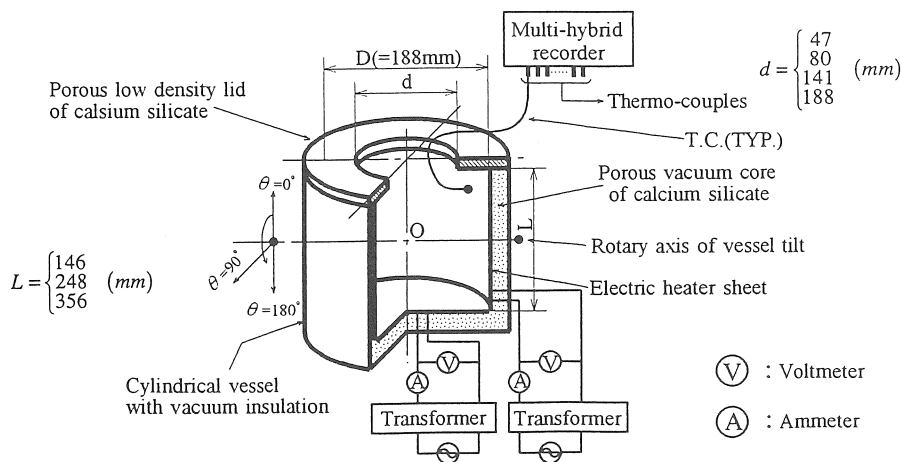


図1 ソーラーレシーバーの概略

2. 実験装置の概要と熱伝達実験

実際のシステムにおいては当然の事ながら熱源として太陽光を用いるわけであるが、太陽光の授受には季節や天候、時間など不安定要素が多いため、実験にはいささか不向きである。そこで、図1に示すような電気ヒーターでレシーバー洞内の空気を加熱する模擬的なレシーバー装置を製作し、実験に使用している。その結果、より定常的な熱入力が容易に得られ、しかもレシーバー内壁をできるだけ均一の温度になるよう、加減しながら加熱することができる。箔状のヒーターをレシーバー内の底面および側面に貼り付けてあり、ヒーターに加える電圧はスライダックで調節し、これにより実験時のヒーターからの入力熱量が制御される。この装置では、ヒーターによる発熱量がほとんどレシーバー洞回りの壁に供給され、それから洞内の空気に熱伝達されるよう洞壁の十分な断熱性を確保するため、レシーバー洞部を真空断熱容器にしてその実現を図っている。また、レシーバー内壁表面上の温度測定用の熱電対はレシーバーの軸対称性や姿勢変化を考慮しつつ、内壁の主要な位置に取り付けられており、データ整理のための壁面平均温度 T_w には、これらの点で測定された温度の平均値を採用している。また同壁からレシーバー

洞内空気への熱流束 q はヒーターの毎時の発熱量 Q と加熱壁表面積 A を測定し、 Q を A で除することで決定している。この実験では図1に示す深さ L の異なる3種類（具体的な値は図1に表示）のレシーバーとアパーチャ径 d の値が異なる4種類の蓋（図1参照）が用意されている。

更に、レシーバー内の空気の対流現象、およびアパーチャ部から空気の流れに乗って熱が漏洩するさまを観察するために、図2のような透明なヒーターを底面および側面に貼り付けたガラス製のレシーバーを別に用意し、これによる空気流の可視化も行った。この場合、スリット状に広げられたレーザー光線を容器の中心軸に沿ってレシーバーを縦に切断するように投影、他方レシーバー内部の空気中には低密度の中空樹脂粒子、もしくはアルミニウムの微粒子を浮遊させる。そして、この投影面の光帯にこれらの粒子が存在するとき光を反射するため、その動きを側面から空気流の動きとして視覚的に観察することができる。

3. 実験結果の整理と実験式の導出

レシーバーからの熱損失はその姿勢とアパーチャ

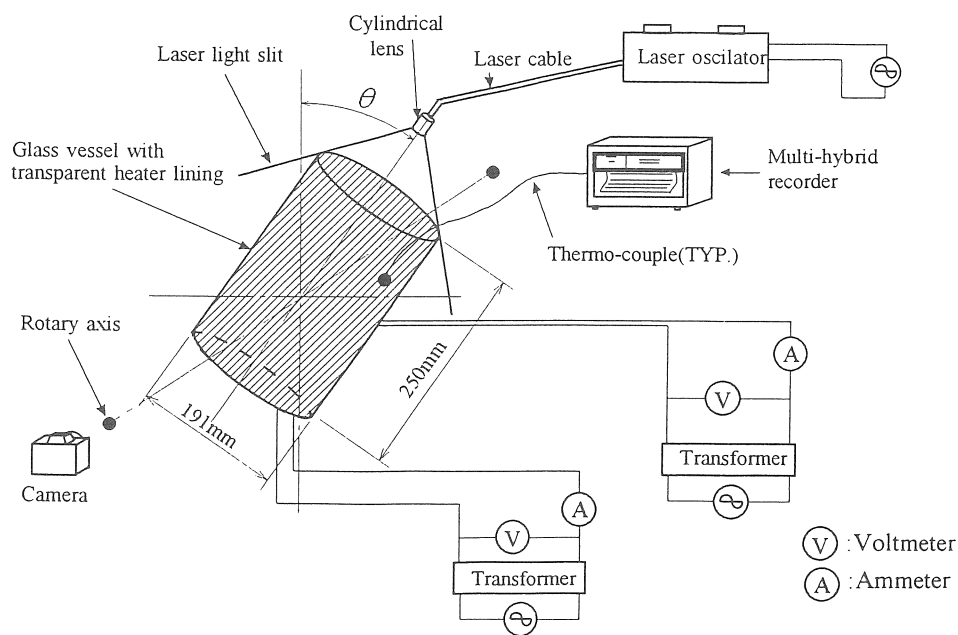
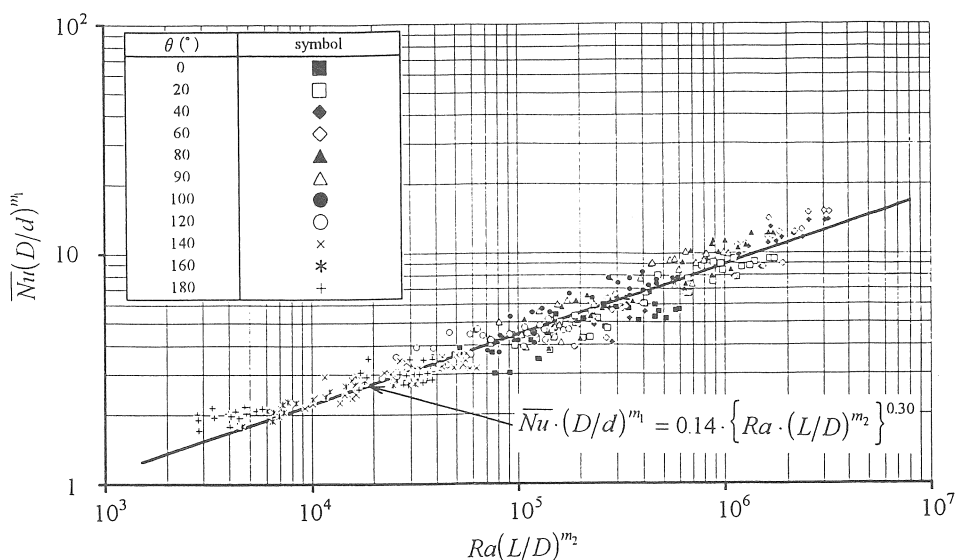


図2 可視化用実験装置の概略


 図3 $\overline{Nu}(D/d)^{m_1}$ と $Ra(L/D)^{m_2}$ の関係

径によって非常に変わることは容易に想像される。さらにここでの熱損失問題は、主として自然対流熱伝達によるものと考えられるので、慣例に従って、実験結果は平均ヌセルト数 $\overline{Nu}$ とレイリー数 Ra で整理することを試みる。

さて、まず代表長さ ℓ は、レシーバー洞内深さ L とレシーバー内径 D とが関係することを考慮に入れて、

$$\ell = \frac{DL}{D+4L} \quad (1)$$

で定義し、この代表長さを用いて平均ヌセルト数 $\overline{Nu}$ とレイリー数 Ra を各々、

$$\overline{Nu} = \frac{\bar{h}\ell}{\lambda} = \frac{q\ell}{\lambda\Delta T} \quad (2)$$

$$Ra = \frac{g\beta\Delta T\ell^3}{\kappa\nu} \quad (3)$$

で表す。

さらに、レシーバー傾き角度 θ を図1に示してあるようにレシーバーの孔口が上に向いている状態が $\theta=0^\circ$ 、下に向いたときを $\theta=180^\circ$ とし、この θ およびアパーチャ径 d の影響を加味した平均ヌセルト数 $\overline{Nu}$ とレイリー数 Ra の関係式を次のようにおけるものと仮定する。

$$\overline{Nu} = C \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^{m_1} \left\{ Ra \cdot \left(\frac{L}{D}\right)^{m_2} \right\}^{m_3} \quad (4)$$

ここで、上式に見られる定数 C 、 m_1 、 m_2 、そして m_3 は得られた多くの実験データを参考に後に定める定数である。そこで、ここでは θ 、 L 、それに d をパラメータに、 $\overline{Nu}$ と Ra との関係を種々グラフ上にプロット、これらの定数を適切に決めることで Q 、 L それに d などの値が異なる状態で測定された多くの実験点が一つの線図上にプロットできるように試みる。その結果最少自乗法などの方法も含む幾多の試行錯誤の末にここでは C および m_3 の値を次のように決めることができた。

$$C = 0.14 \quad (5)$$

$$m_3 = 0.30$$

また、定数 m_1 、 m_2 は次式

$$m_1 = k_1 + \left(\frac{L}{D} - 1\right) \{c_1 \sin(a_1\theta + \alpha_1)\} \quad (6)$$

$$m_2 = k_2 + \left(\frac{1}{\frac{L}{D} - 1}\right) \{c_2 \sin(a_2\theta + \alpha_2)\}$$

で表され、(5)、(6)の両式中の文字 k_i 、 c_i 、 a_i 、 α_i ($i=1,2$) は次のように与えられる。

$$\begin{cases} k_1 = 0.77 \\ c_1 = 0.63 \\ a_1 = 1.80 \\ \alpha_1 = -10 \end{cases} \quad (7)$$

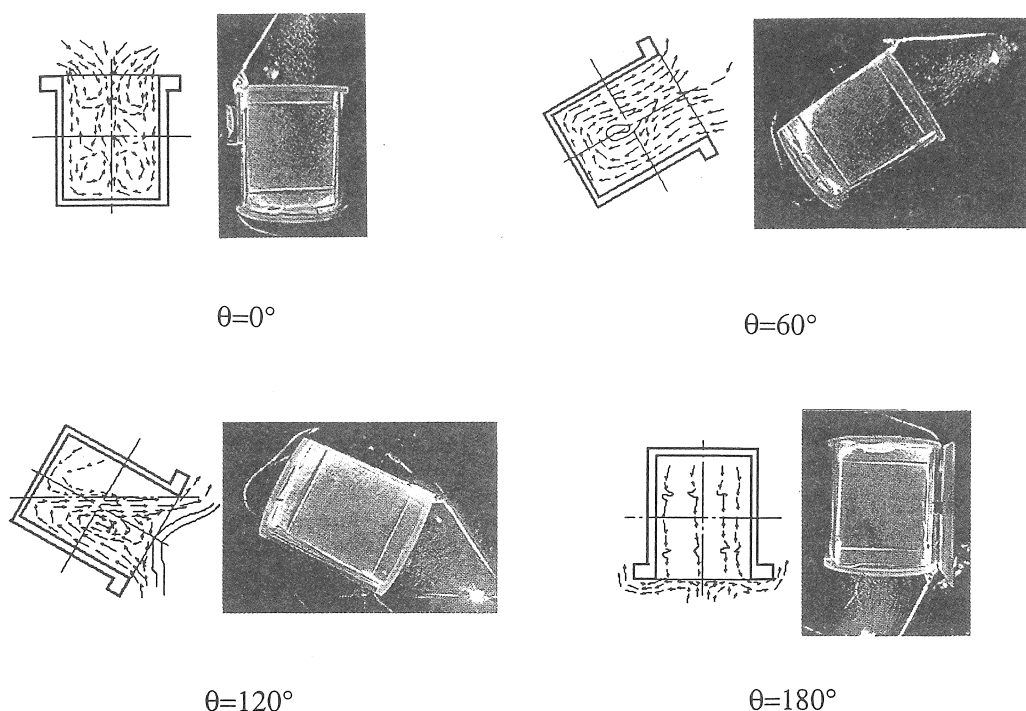


図4 レシーバー内部およびアパーチャ部における空気の流れ

$$\begin{cases} k_2 = 9.03(L/D)^2 - 22.7(L/D) + 13.2 \\ c_2 = 0.81(L/D) + 1.75 \\ a_2 = 0.45(L/D) + 0.67 \\ \alpha_2 = -22.5(L/D) + 56.6 \end{cases} \quad (8)$$

図3は $\overline{Nu}(D/d)^m$ を縦軸に、 $Ra(L/D)^m$ を横軸に選び、実験点をプロットしたもので、図中の実線は C および m_3 の値を(5)式で示した値を採用したときの(4)式の関係を表したものである。この図から判るように(6)、(8)の両式はやや複雑な関係式になっているが、実験点は d 、 L 、それに θ に係わりなくほぼ実線に載るかたちで整理されていることが判る。

他方、図4はさきの図2の装置によりレシーバー洞内外の空気の流れの様子の代表的なものについて示したもので、流れの様子は実際には観察に加えて、その状況変化をビデオにも撮しているがここでは、空気の動きをよりはっきりさせるために手書きによるスケッチを付加させている。

この図から、空気流はレシーバーの傾き角度 θ が 0° の場合を除いた 120° 以下の場合、レシーバー内部に一つまたはそれ以上の渦を形成することが容易に理解できる。空気の渦の数は内壁温度の上昇とともに増加することも観察された。また、流入する空気流と流出する空気流が衝突することもなく、一つの流れに載って動いていることも見られ、空気の入れ換えは非常にスムーズである。なお、この場合 θ が 0° から次第に増加するにつれて内部の空気流の動きは活発となり、 60° 付近で最も活発となる。それ以上では θ が増加するにつれて空気流の動きは徐々に弱まる。一方、 θ が 0° と 180° では上昇流と下降流の入れ換えがうまく行われておらず、特に後者は内部に小さな渦が幾つか形成されているものの、空気の動きはほとんど見られない。

いずれにせよ、このような空気流の動きとその動きの活発さはレシーバーからの熱損失の度合いに直接関係しているのは明かである。

4. おわりに

本研究ではレシーバーからの自然対流熱伝達による熱損失を対象に、実験的に研究し、その結果を一つの実験式で整理することができた。この点、他の研究者や過去の我々の研究の結果に見られた場合分けされた整理の仕方に比べれば、煩雑さを避けることができより実用に供する実験式を提示できたと考える。しかしながら、実際のソーラーシステムにおけるレシーバーでの熱伝達現象は複雑で、正確な値を求めることは非常に困難である。そのため、ここに見られるように研究室規模で簡素化した装置による実験結果をそのまま実際のシステムに適用するのは少々無理な面も生じようが、少なくとも、風が存在しない場合にはさほど実際の系のものとかけ離れることはないものと想像される。しかも、実験点を一つの式で整理することができたことは非常に有益な結果と考えられる。

また、空気流の可視化は、レシーバーの姿勢によって空気の流れがどのように変化するかを理解する上で大いに役立っている。これらの結果は、実際のシステムにレシーバーを選定する際においても、その形状を決定する上で非常に有効に利用できるであろう。

今後、風の影響も加えた実験も、逐次実施する予定である。

参考文献

- [1] Causing A.M., "An Analysis of Convective Losses from Cavity Solar Central Receivers", *Solar Energy* Vol.27, p.295, 1981.
- [2] Causing A.M., "Convective Losses from Cavity Solar Receivers — Comparisons between Analytical Predictions and Experimental Results", *J. of Solar Energy Engineering* Vol.105, p.29, 1983.
- [3] McMordie R.K., "Convection Heat Loss from a Cavity Receiver", *J. of Solar Energy Engineering* Vol.106, p.98, 1984.
- [4] Bochm R.F., "A Review of Convective Loss Data from Solar Central Receivers", *J. of Solar Energy Engineering* Vol.109, p.101, 1988.
- [5] Stine W.B. and McDonald C.G., "Cavity Receiver Convection Heat Loss", *Proc. of the International Solar Energy Society, Solar World Congress*, p.1318, 1989(Kobe, Japan).
- [6] Hogen R.E., Diver R.B. and Stine W.B., "Comparison of a Cavity Solar Receiver Numerical Model and Experimental Data", *J. of Solar Energy Engineering* Vol.112, p.189, 1990.
- [7] 藤井, 土屋, 佐藤, "ソーラーレシーバーからの熱損失", 日本太陽エネルギー学会講演論文集, pp.45-48, 1989.
- [8] 藤井, 海老原, 矢嶋, "ソーラーレシーバーからの熱損失(続報)", 日本太陽エネルギー学会講演論文集, pp.101-104, 1990.
- [9] 藤井, 土屋, "太陽熱利用システムにおける集光・受熱系の性能予測", *J. of Japan Solar Energy Society* Vol.19, No.4, pp.25-30, 1993.
- [10] Fujii I., Itoh N. and Mase T., "Experimental Study on Free Convective Heat Transfer from Cavity-type Solar Furnace", *Proc. of 7th International Conference on Stirling Cycle Machines*, pp.137-142, 1995(Tokyo, Japan).
- [11] 藤井, 伊藤, "ソーラーレシーバーからの自然対流による熱損失", 日本太陽エネルギー学会講演論文集, pp.273-276, 1996.