

CFシート空気式集熱器の集熱効率に 及ぼす入射スペクトルの影響

Effects of Spectrum on Thermal Efficiency of an Air - Type CF - sheet Solar Collector

姜 希 猛^{*1}

Xi - meng JIANG

馬 場 弘^{*2}

Hiromu BABA

金 山 公 夫^{*2}

Kimio KANAYAMA

遠 藤 登^{*2}

Noboru ENDOH

Abstract

The collecting performance of an air - type CF - sheet solar collector under the incident radiation with Moon's spectrum has been numerically analyzed by the authors. In this paper, to make clear the effect of spectrum on the collecting performance, three kinds of simple and ideal spectra are used for calculation. The former two are assumed to be simple rectangular and triangular shaped spectra with $1\mu\text{m}$ width of wavelength, and the later one is Planck's radiation spectrum. It was found that, whenever peak wavelength λ_{max} was smaller than $2.0\mu\text{m}$, the collector efficiency was not changeable with the radiation intensity, spectrum shape and peak position of the spectrum. When λ_{max} was larger than $2.4\mu\text{m}$, the collector efficiency and a collector coefficient F' decreased with increasing wavelength of the spectrum. The efficiencies obtained by applying Moon's spectrum with air mass $m=1\sim5$ were compared each other, and F' became greatest when $m=1$. Since a projector of solar simulator usually consists of several number of Xenon lamps or Halogen lamps, using spectrum of Xenon lamps to calculate the performance of CF - sheet collector, the calculated results are well compared with the measured under the solar simulator. For the various intensities of Halogen lamp's spectrum, the F' factors are a little changeable and the efficiency curves are converged into the almost one line smaller than that of Xenon.

Key Words : Solar Energy, Air-Type CF-Sheet Collector, Collector Efficiency, Spectrum Analysis, Simulation Calculation

1. まえがき

現在実用になっている水または不凍液集熱式の平板型集熱器は、一般に波長選択性のあるガラス透過板と波長依存性のある吸収板から構成されている。著者ら^{(1)~(4)}はかつて固有の波長特性を有するガラス板と、波長依存性の異なる選択性および非選択性吸収板からなる平板型集熱器を対象に、選択性吸収板の吸収率の波長特性が変化することによる集熱量、集熱効率に及ぼす影響について、ふく射伝熱を主体に数値解析を行い、同時に手製の集熱器モデルによって計算結果を実証した。

その解析および実験結果によると、選択性を有する吸収板を用いたものは非選択性のものより集熱効率はよく^{(1)~(4)}、また選択性吸収板でもその波長特性の相違が集熱効率に相当程度影響を及ぼすことが明らかにされた⁽³⁾。

また著者ら^{(6)~(9)}は最近、炭素繊維シート(CFシート)を集熱材に用いた平板型CFシート空気式集熱器のユニット型モデルを作製し、これについてふく射伝熱を主体

に集熱性能を解析し、種々の条件に対してあらかじめ数値計算すると同時に、屋内および屋外において種々の条件で実験を繰り返し、その性能を明らかにしてきた。実測によれば集熱材に用いたCFシートは波長選択性のない吸収率の比較的高い($\alpha=0.8\sim0.9$)材料である⁽⁵⁾。過去の研究⁽¹⁰⁾によれば、平面の吸収板を用いた空気式集熱器は一般に水式集熱器に比べて性能は劣るとされているが、著者らのこれまでの研究⁽³⁾でCFシート2枚とガラス1枚で構成された空気式集熱器の集熱効率は、非選択性吸収板を用いた水式集熱器と同程度の集熱効率を有することが分かった。

しかし、これまでのCFシート空気式集熱器の性能測定において屋内のソーラーシミュレータのもとでの実験と屋外の太陽光のもとでの実験では、後者のほうが性能がよくなる結果が示され、その原因は主に集熱器への入射光スペクトルの相違によるものと考えられる。

そこで本研究では、2枚のCFシートおよび1枚のガラス板からなるCFシート空気式集熱器の性能が、入射

*1会員、北見工業大学大学院

*2会員、北見工業大学工学部(〒090-8507 北見市公園町165)

(原稿受付 平成10年12月18日)

Student at Graduate Course, Kitami Institute of Technology
Dept. of Mech. Engng., Kitami Institute of Technology

光のスペクトルの波長特性にどのような影響を受けるかについて、これまでの解析手法を用いて数値計算により定量的に明らかにした。その際、解析に用いたスペクトルは単純な波形、理想的な波形および実際の波形を与えて種々の条件のもとで計算を行って集熱効率の比較、検討を行った。

主な記号および単位

- E_λ : 任意に与えた分光入射強度 $W/(m^2 \cdot \mu m)$
 $E_\lambda(m)$: エアマス m の分光日射強度 $W/(m^2 \cdot \mu m)$
 $F_\lambda(T^*)$: 波長 λ における温度 T^* の黒体からの放射強度 $W/(m^2 \cdot \mu m)$
 F : 集熱器係数
 G : ガラス
 J : 集熱面入射光強度または日射量 W/m^2
 Q : 集熱面積当たりの熱量 W/m^2
 $S1$: CFシート 1
 $S2$: CFシート 2
 T^*, T : 温度 $K, ^\circ C$
 $\Delta T: (T_{in} + T_{ex})/2 - T_a = T_A - T_a$ $^\circ C$
 U_L : 集熱器の熱損失係数 $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$
 V : 空気流量 m^3/min
 α : 吸収率
 τ : 透過率
 τ_s^* : CFシートの入射光トラップ率 ($= 0.9$)
 η : 集熱効率
 λ : 波長 μm

添字

- a, A: 外気、空気平均値
in, ex: 入口、出口
G, S: ガラス、CFシート
CBO: 対流により底面から外部へ
CG10: 対流によりガラス G1 から外部へ
G1S1: 放射によりガラス G1 からシート S1 へ
G1S2: 放射によりガラス G1 からシート S2 へ
FAG1: 対流により内部空気から G1 へ
FAE: 空気による有効集熱成分
S1G1: 放射によりシート S1 からガラス G1 へ
S1S2: 放射によりシート S1 からシート S2 へ
S2G1: 放射によりシート S2 からガラス G1 へ
S2S1: 放射によりシート S2 からガラス S1 へ
 λ : 波長

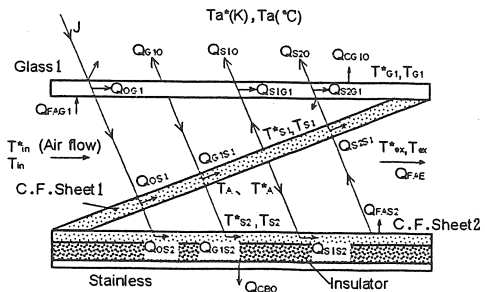


Fig.1 Heat balance of the collector model

2. 数値解析

解析方法は前報⁽⁸⁾に述べた方法による。図1に示される集熱器の集熱モデルを設定し、各部材において次のような熱収支の平衡式が成立する。

$$Q_{CS1} + Q_{G1S1} - Q_{S1G1} - Q_{S1C} - Q_{S1S2} + Q_{SS1} - Q_{FAG1} + Q_{FAS2} - Q_{FAE} = 0 \quad \text{シート S1} \cdots \cdots (1)$$

$$Q_{CG1} - Q_{G1C} - Q_{G1S1} + Q_{S1G1} - Q_{G1S2} + Q_{S2G1} - Q_{CG10} + Q_{FAG1} = 0 \quad \text{ガラス G1} \cdots \cdots (2)$$

$$Q_{CS2} + Q_{G2S2} - Q_{S2G2} + Q_{S2S1} - Q_{SS2} - Q_{CBO} - Q_{FAS2} = 0 \quad \text{シート S2} \cdots \cdots (3)$$

式(1)～(3)において、2枚の集熱材のCFシート S1、S2 および透過材のガラス G1 に吸収された入射光エネルギー Q_{OS1} 、 Q_{OS2} 、 Q_{OG1} は、それぞれ波長依存性のあるガラスの透過率(図8の $\tau_{G\lambda}$) および入射光強度に関する積分関数で次のとおり表される。

S1 において

$$Q_{OS1} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_{G\lambda} \cdot \tau_s^* \cdot \alpha_s \cdot E_\lambda(m) / AA \cdot d\lambda \quad (4)$$

G1 において

$$Q_{OG1} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \alpha_{G\lambda} \cdot E_\lambda(m) / AA \cdot d\lambda \quad (5)$$

S2 において

$$Q_{OS2} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_{G\lambda} \cdot (1 - \tau_s^*) \cdot \tau_s^* \cdot \alpha_s \cdot E_\lambda(m) / AA \cdot d\lambda \quad (6)$$

式(4)～(6)において、AA はスペクトルの全波長域に対する積分値(スペクトル面積)と入射光強度の割合で、式(7)に示される。

$$AA = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{\lambda}(\lambda) \cdot d\lambda / J \quad (7)$$

式(1)～(3)を繰り返し計算することにより、各式の平衡条件から各部材の温度および集熱量 Q_{FAE} が算出される。それによって集熱器の集熱効率 η は次の式で求められる。

$$\eta = Q_{FAE} / J \quad (8)$$

3. 仮想スペクトル入射光

ここで、幾つかのスペクトルを仮想して入射光強度 $J=200 \sim 1000 \text{ W/m}^2$ 、空気流量 $V=3 \text{ m}^3/\text{min}$ 、外気温度 $T_a = -10^\circ\text{C}$ 、外部風速 $v=0.5 \text{ m/s}$ の条件のもとで、入口温度 T_{in} を変化させて集熱効率を求める。その結果を最小二乗法により式(9)の形で集熱効率線図の近似式を求め、同時に集熱器係数 F' を算出して性能を比較、検討する。

$$\eta = F' \{ (\tau \alpha)_{eff} - U_L (T_A - T_a) / J \} \quad (9)$$

3.1 矩形状スペクトル

図2(a)および(b)に計算に用いた入射光の矩形状スペクトルを示す。A、B、C、D、EおよびFはそれぞれ同じ波長幅 $1 \mu\text{m}$ の $0.3 \sim 1.3 \mu\text{m}$ 、 $0.7 \sim 1.7 \mu\text{m}$ 、 $1.1 \sim 2.1 \mu\text{m}$ 、 $1.5 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 、 $1.9 \sim 2.9 \mu\text{m}$ および $2.3 \sim 3.3 \mu\text{m}$ の波長範囲で、分光入射光強度 $1000 \text{ W/(m}^2 \mu\text{m)}$ のスペクトル、すなわち入射強度 1000 W/m^2 である。A1、A2、A3、A4 および E1、E2、E3、E4 は波長域 $0.3 \sim 1.3 \mu\text{m}$ および $1.9 \sim 2.9 \mu\text{m}$ における入射光強度がそれぞれ $J_1=800 \text{ W/m}^2$ 、 $J_2=600 \text{ W/m}^2$ 、 $J_3=400 \text{ W/m}^2$ および $J_4=200 \text{ W/m}^2$ のものである。この仮想スペクトルはガラスの分光透過率(図8)に対して、同一波長域の入射光の波長域および強度の変化に対する集熱効率の変化を検討するためである。

以上の各スペクトルに対して計算された集熱効率線図を図3に示す。グラフから、スペクトルAの集熱器係数 $F'_A=0.952$ で効率線は高く、波長 $0.7 \sim 2.5 \mu\text{m}$ におけるB、C、Dのスペクトルは集熱器係数 $F'_{B,C,D}=0.925 \rightarrow 0.916$ であり、Aよりやや小さく、効率線は互いに接近する。E、Fのスペクトルの集熱器係数は $F'_E=0.734 \rightarrow F'_F=0.560$ のように大きく低下する。また、同じ波長域の入射光強度の変化による計算結果は $F'_{A1 \sim A4}=0.928 \sim 0.952$ 、 $F'_{E1 \sim E4}=0.729 \sim 0.735$ であり変化しない。これにより、中央波長が $2.0 \mu\text{m}$ より小さい波長域の矩形

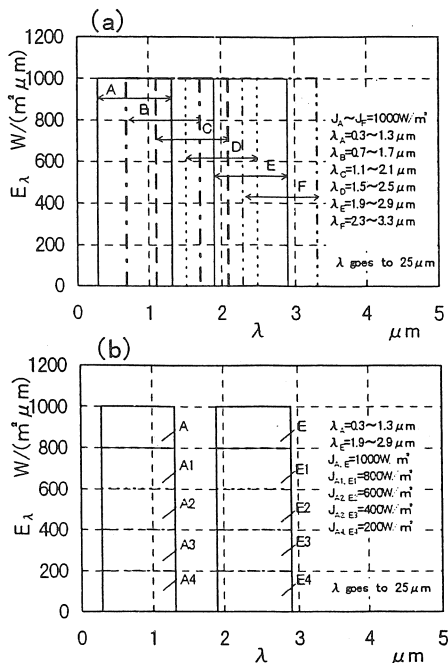


Fig.2 Rectangular spectra

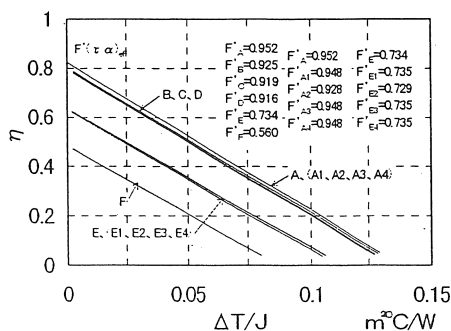


Fig.3 Collecting efficiency under rectangular spectra

スペクトルに対する集熱効率線図は入射光強度および波長位置変化によってほとんど変化しない。しかし、中央波長が $2.4 \mu\text{m}$ より大きくなると、集熱効率が急に低下することが分かる。

3.2 三角形状スペクトル

図4は計算に用いた三角形状スペクトルを示す。矩形スペクトルのように、同じ形の6つのスペクトルA、B、C、D、EおよびFは波長幅は $1 \mu\text{m}$ 、波長範囲それぞれ $0.3 \sim 1.3 \mu\text{m}$ 、 $0.7 \sim 1.7 \mu\text{m}$ 、 $1.1 \sim 2.1 \mu\text{m}$ 、 $1.5 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 、 $1.9 \sim 2.9 \mu\text{m}$ および $2.3 \sim 3.3 \mu\text{m}$ で、入射光強度

$J=1000\text{W/m}^2$ に設定される。また、 $0.3\sim 1.3\mu\text{m}$ および $1.9\sim 2.9\mu\text{m}$ の波長域における A および E の入射光強度をさらに $J_1=800\text{W/m}^2$ 、 $J_2=600\text{W/m}^2$ 、 $J_3=400\text{W/m}^2$ 、 $J_4=200\text{W/m}^2$ のそれぞれ4つに設定され、全てのスペクトルはともに2等辺三角形である。

これらの三角形スペクトルに対して計算された効率線図を図5に示す。グラフにおいて、同じ波長域にある入射光強度によるそれぞれ5つのスペクトル A、($A_1\sim A_4$)、E、($E_1\sim E_4$)による効率係数は $F'_{A, (A_1\sim A_4)}=0.934$ 、 $F'_{E, (E_1\sim E_4)}=0.751$ で変化しないことが分かる。また、矩形スペクトルと同じように、ピーク波長が $2.0\mu\text{m}$ より小さい波長域で $F'=0.907\sim 0.934$ となり、効率線の変化が小さい。ピーク波長が $2.4\mu\text{m}$ を越えると効率線が大きく低下する。集熱器係数 $F'_{A, (A_1\sim A_4)}$ および $F'_{E, (E_1\sim E_4)}$ は一定で、また同じ波長域の矩形スペクトルの比較により、集熱器係数の変化が小さい。これにより、集熱効率線図がスペクトルの形状にほとんど依存しない。しかし、スペクトルピーク値で $2.4\rightarrow 2.8\mu\text{m}$ に変化すると $F'_E=0.751\rightarrow 0.503$ と急激に低下し、三角形スペクトルのほうが矩形スペクトルより効率低下の度合いがやや大きいことが分かる。

3.3 Planck の式によるスペクトル

太陽光は絶対温度 5762K の黒体からのふく射に近似するものとすれば⁽¹¹⁾、その入射光スペクトルの分布は Planck のふく射式で表され、自然の太陽光は本スペクトルに最も近いと考えられる。Planck の式は次のとおりである。

$$F_\lambda(T^*)=C_1/[\lambda^5(e^{C_2/\lambda T^*}-1)] \quad (10)$$

ここで、 $C_1=3.7417\times 10^8\text{W}\cdot\mu\text{m}^4/\text{m}^2$ 、 $C_2=1.4388\times 10^4\mu\text{m}\cdot\text{K}$ 。

いま入射光の条件としては、式(10)を温度 T^* のスペクトルのピーク波長 λ_{max} に相当する $F_{\lambda_{\text{max}}}(T^*)$ で割って基準化し、係数をかけて一定の積分強度 ($J=1000\text{W/m}^2$) を得るものとする。すなわち

$$J=\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_\lambda(T^*)d\lambda=\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{F_\lambda(T^*)}{F_{\lambda_{\text{max}}}(T^*)}\times\text{BB}d\lambda \quad (11)$$

ここで、BB は異なるふく射温度に対して各スペクトルの積分値(日射量)を等しくするため(この場合 1000W/m^2) の補正係数である。

図6は温度が $T_A^*=5762\text{K}$ 、 $T_B^*=4500\text{K}$ 、 $T_C^*=3500\text{K}$ 、

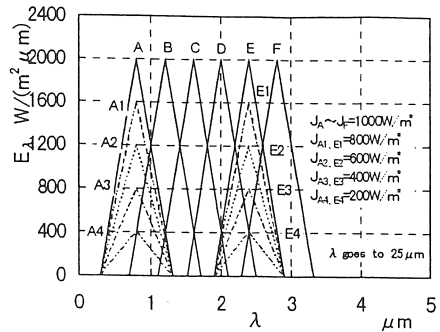


Fig.4 Triangular spectra

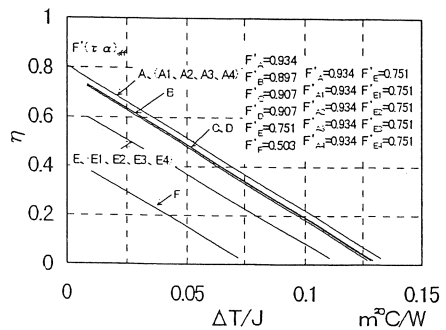


Fig.5 Collector efficiency under triangular spectra

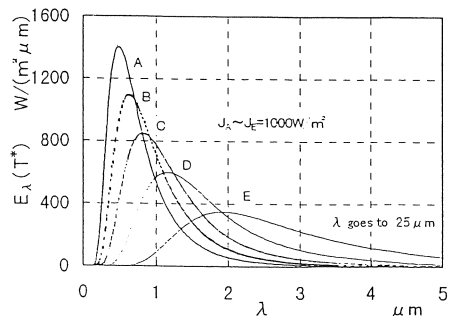


Fig.6 Planck's radiation spectra

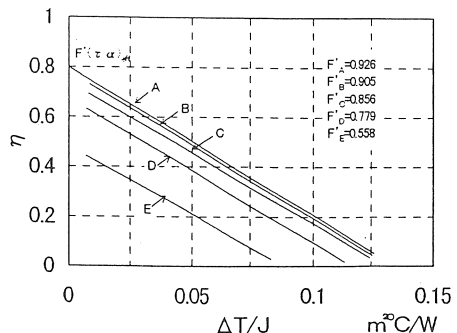


Fig.7 Collector efficiency under Planck's radiation spectra

$T_D^*=2500\text{K}$ 、 $T_E^*=1500\text{K}$ の黒体ふく射として、式 (1) の $E_\lambda (T^*)$ により得られた5つのスペクトル分布を示す。これらの温度に対して BB はそれぞれ 1403、1094、847、599 および 350 である。グラフから、A から E までの5つのスペクトルはふく射温度の低下とともに、ピークにおける分光強度が小さくなり、次第に緩やかな山になる。ただし、入射光強度は $J_A=J_B=J_C=J_D=J_E=1000\text{W/m}^2$ の一定に設定される。その際、ピークに対応する波長が右にずれて、それぞれ $\lambda_A=0.50\mu\text{m}$ 、 $\lambda_B=0.64\mu\text{m}$ 、 $\lambda_C=0.82\mu\text{m}$ 、 $\lambda_D=1.16\mu\text{m}$ 、 $\lambda_E=1.92\mu\text{m}$ となる。これらのスペクトルを用いた集熱効率の計算結果を図7に示す。 $F'_A=0.926$ 、 $F'_B=0.905$ 、 $F'_C=0.856$ 、 $F'_D=0.779$ 、 $F'_E=0.558$ となり、短い波長域におけるピークの大きいスペクトルほど集熱効率が大きく、したがってスペクトルが A から E に変化すると集熱効率が小さくなる事が分かる。

4. 標準日射および疑似スペクトルによる計算

4.1 Moon の日射スペクトル

以上、仮想した3種類のスペクトルによる集熱効率を計算し、スペクトルによる集熱効率線図および集熱器係数 F' への影響を検討した。その結果、同じ波長域におけるスペクトルでは形状および強度の変化による効率への影響は小さいが、波長位置の変化による効率の変化は大きい。特に、波長域の上限は約 $2.3\mu\text{m}$ を越えると集熱効率が大きく低下する。その原因は、式 (4) ~ (6) におけるガラスの透過率の波長依存性のためと考えられる。図8は本研究で用いられる厚さ 3mm のガラスの分光透過率を示す。波長 $0.3\sim 0.8\mu\text{m}$ に透過率の最大値があり、 $0.8\sim 2.3\mu\text{m}$ まではほぼ一定値であるが、 $2.3\mu\text{m}$ 以上では急に低下して $2.6\mu\text{m}\sim 4.0\mu\text{m}$ で約 0.3 となり、波長 $4.0\mu\text{m}$ 以上ではほとんど 0 となる。図中に Moon⁽¹²⁾ の日射スペクトルがエアマス $m=0\sim 5$ について示される。図6の Planck のスペクトルと近似した形だが、大気成分の吸収および散乱によりある波長帯で日射強度が小さくなる。ピーク波長は $0.4\sim 0.6\mu\text{m}$ にあり、太陽高度の低下 (エアマス m の増大) ともに右にわずかに移動する。

これらのスペクトルを用いて計算した効率線図を図9に示す。ここで、スペクトルによる入射強度が違うが、集熱器に入射する日射強度は一定の $J=500\text{W/m}^2$ として計算した。グラフにおいて、 $m=1\sim 5$ に変化すると、 $F'_{m=1\rightarrow 5}=0.915\rightarrow 0.831$ となり、集熱効率が低下することが分かる。このことから、一日のうち南中時の太陽高

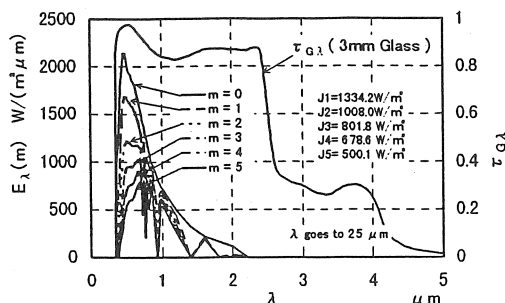


Fig.8 Moon's standard spectra and spectral transmittance of glass

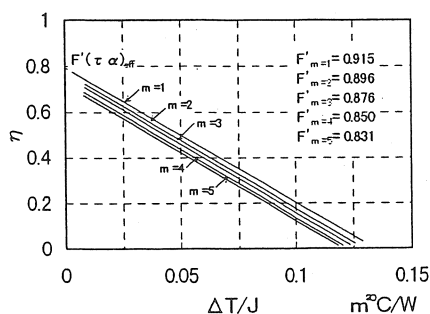


Fig.9 Collector efficiency under Moon's spectrum

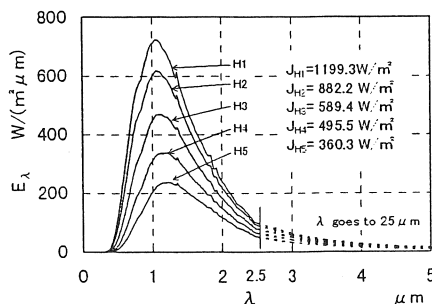


Fig.10 Halogen lamp's spectra

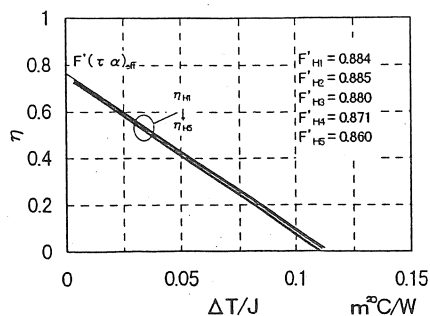


Fig.11 Collector efficiency under halogen lamp's spectra

度 (m の最小値) において集熱器の最大効率を得られることが分かる。しかし、集熱できる時間帯の太陽高度の変化による影響は日射量および外気温度などによる影響と比べると小さい。

4.2 ハロゲンランプのスペクトル

図 10 は強度別に示したハロゲンランプの 5 本のスペクトル⁽¹³⁾である。測定器の関係で $0.28 \sim 2.5 \mu\text{m}$ の波長範囲の測定値しかないが、ここで式 (11) の関係を用いて温度 2400K の条件で計算した日射スペクトルを $25 \mu\text{m}$ まで補足する。図 10 において、この 5 本のスペクトルはピークはすべて近赤域にありわずかに移動するが、分布形状が互いに相似していることが分かる。

図 11 に、これらのハロゲンランプのスペクトルによる計算結果を示す。これによると各効率線図は互いに接近していることが分かる。これにより、ハロゲンランプを光源に用いた場合、光強度が相違していても長波長域にピーク値を有し波形が相似する。測定された CF シート集熱器の集熱効率線図はほぼ一本に集まり、しかも値が小さいことが分かる。図において、スペクトルの補足された部分はガラス透過率が低下する $\lambda > 2.5 \mu\text{m}$ の波長域にあり、この成分も効率をやや低下させる一因となり、 $F_{\text{H1}}=0.884 \rightarrow F_{\text{H5}}=0.860$ となる。

4.3 ソーラーシミュレータのスペクトルによる測定精度の検討

前報⁽⁹⁾の測定結果によりソーラーシミュレータによる、CFシート空気式集熱器の集熱性能が明らかになった。しかし、その値は Moon のスペクトルによるシミュレーション結果より小さい。その原因の一つは計算において集熱器の側面からの熱損失が省略されたことである。二つめはクセノンランプを光源とするシミュレータのスペクトルは Moon のそれとは異なるためである。

計算結果を図 13 に示す。図において、計算に取り入れた条件は実験の際の外気温度および日射量のもとで 3 段階の空気流量に対応した入口温度範囲である。上の 2 本の効率線図のうち点線は Moon のエアマス 1.5 のスペクトルによる計算結果であり、下の実線はソーラーシミュレータのスペクトルによる計算結果である。一番下の太い実線はソーラーシミュレータによる実測結果である。これらを比較すると、ソーラーシミュレータのスペクトルによる計算結果は Moon のスペクトルによるそれより測定値に近似することが分かる。以上により、C

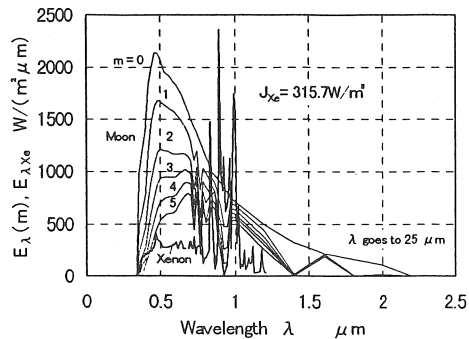


Fig.12 Comparison between Xenon's spectrum of solar simulator and Moon's spectra

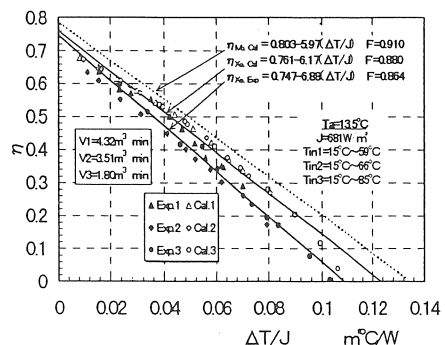


Fig.13 Comparison of collector efficiencies under Xenon's spectra of solar simulator and Moon's spectrum

Fシート集熱器の集熱性能は入射光のスペクトルによって影響を受けることが実証された。

6. むすび

入射光スペクトルによるCFシート空気式集熱器の性能に与える影響を調べるために、まず矩形、三角形および Planck のふく射式による仮想スペクトルを設定して計算を行い、次にハロゲンランプおよびクセノンランプからなるソーラーシミュレータのスペクトルおよび Moon のスペクトルによる計算を行い、集熱効率線図および集熱器係数によって集熱性能の比較を行った。得られた結果をまとめれば次のとおりである。

- (1) CFシート空気式集熱器の仮想スペクトルによる集熱器性能は、ガラス板透過率の波長依存性のため、ピークが $2.0 \mu\text{m}$ より短い波長域では、

ピーク位置および入射強度の変化に対する効率の変化が小さいが、 $2.4\mu\text{m}$ 越えるとその影響が表れ、効率が急に低下する。

- (2) Moon のスペクトルを用いた場合、太陽高度の低下（エアマスの増大）とともに効率がやや低下するので、1日のうち南中時に集熱性能が一番良くなる。
- (3) クセノンランプを光源とするソーラーシミュレータのスペクトルによる計算結果は Moon のスペクトルによる計算結果より小さく、ソーラーシミュレータによる測定結果に近い値を示す。
- (4) 相似した5本のハロゲンランプのスペクトルでは入射光強度が変化しても集熱器の集熱性能の変化が小さく、集熱効率の値も低い。
- (5) CFシート空気式集熱器の集熱性能は入射光強度よりも、スペクトル分布によって大きな影響を受けるので、その測定においてはこれらの点を十分に留意して行う必要がある。

参考文献

- (1) 金山公夫、馬場弘、波長依存性を考慮した平板型集熱器の性能、第21回日本伝熱シンポジウム講演論文集（1984-5）、376-378。
- (2) 金山公夫、馬場弘、炭素繊維シートを集熱材とする空気式集熱器の解析、第22回日本伝熱シンポジウム講演論文集（1985-5）、280-282。
- (3) Kanayama, K. Radiative Property of Absorbing Materials and its Collection Efficiency. Int. J. Solar Energy, 4., (1986), 353-368。
- (4) Kanayama, K. and Baba, H. Analysis and Experiment of the Performance of a Flat-Plate Solar Collector Considering the Wavelength Dependence, Solar & Wind Technology, 6-1 (1989), 51-58。
- (5) 金山公夫、馬場弘、小関清憲、中島治希、炭素繊維シートへのふく射性質、熱物性、6-2 (1992)、78-92。
- (6) 姜希猛、金山公夫、馬場弘、遠藤登、炭素繊維シート空気式集熱器の性能解析および実験、第34回日本伝熱シンポジウム講演論文集（1997-5）、143-144。
- (7) 姜希猛、金山公夫、馬場弘、遠藤登、ソーラーシミュレータによる炭素繊維シート空気式集熱器の性能測定、第35回日本伝熱シンポジウム講演論文集（1998-5）、569-570。
- (8) 姜希猛、金山公夫、馬場弘、遠藤登、炭素繊維シートを集熱材とする空気式集熱器に関する熱性能の解析、太陽エネルギー、24-6, (1998)、55-62。
- (9) 姜希猛、金山公夫、馬場弘、遠藤登、ソーラーシミュレータによる炭素繊維シート空気式集熱器の性能測定、太陽エネルギー、24-6, (1998)、63-69。
- (10) Lof, G.O.G., Saw L. E. and Oonk, P. L. Comparison of Performance of Solar Collectors of the Air Heating and Water Heating Types, Proc. 1975 Int. Cong., Los Angeles, July (1975), 243-244。
- (11) Duffie, J. D. and Beckman, W.A. Solar Engineering of Thermal Processes. John Wiley & Sons. New York. (1980), 237-239。
- (12) Moon. P., J. Franklin Inst., 230(1940). 583-617。
- (13) 馬場弘による測定値で未発表。