

複合放物面集光(CPC)型スカイラジエータの性能向上に関する研究

(第1報: 2次元CPC型スカイラジエータの最適設計および性能試験)

Cooling Power Enhancement of CPC (Compound Parabolic Concentrator) Sky Radiator
(1st Report; Optimal Design and Experiment for 2-D CPC Sky Radiator)

齋藤 武雄 *1
Takeo S. SAITO

辰尾 光一 *2
Koichi TATSUO

山田 昇 *3
Noboru YAMADA

Abstract

In order to enhance the performance of sky radiation cooling, we have proposed a compound parabolic concentrating (CPC) sky radiator. The CPC-type sky radiator has following features; the incident sky radiation within the acceptance angle is concentrated and absorbed by the radiating surface after one or more reflections on the mirror. While, the incident sky radiation which does not fall within acceptance angle is reflected by the mirror and returned back to the sky without being absorbed. On the other hand, almost all of radiation emitted at the radiating surface passes through the aperture cover, and are rejected to the sky, either directly or with one or more reflections. Therefore, the total amount of the radiation emitted from the radiating surface will become larger than that of the conventional flat plate sky radiator.

In the present paper, we optimize the 2-D geometry of the CPC sky radiator and conduct experimental verification. The results demonstrate that the improved 2-D CPC sky radiator has greater performance of cooling power than the previous CPC sky radiator, which was originally designed as the solar collector. Further, a universal plot using P_{SR}/R and $\Delta T/R$ was proposed for better understanding to include atmospheric radiation and heat losses.

キーワード: 放射冷却, スカイラジエータ, 大気の窓, CPCリフレクタ, 最適設計, 冷却性能試験

Key Words : Sky Radiation Cooling, Sky Radiator, Atmospheric Window, CPC Reflector, Optimal Design, Cooling Power Experiment.

1. 緒言

近年、大気中の二酸化炭素(CO_2)濃度上昇による地球温暖化や都市温暖化などの環境問題が深刻化している。

このような背景のもと、 CO_2 の排出量やエネルギー消費量の削減および冷房排熱の抑制を目的として、自然エネルギーの1つである放射冷却現象(Sky radiation cooling)を利用して冷熱源を得る試みがなされている。放射冷却に関する初期の研究はGranqvist and Hjortsbergの文献⁽¹⁾⁽²⁾にまとめられているが、Catalanotti *et al.*⁽³⁾およびBartoli *et al.*⁽⁴⁾らは、アルミ板にフッ化ポリビニルをコーティングした選択放射面を提案している。また、Lazzarin⁽⁵⁾は黒色塗装面を用いた放射冷却器(以下、スカイラジエータ(Sky radiator)と呼ぶ)により冷水を得る実験を行い、その有効性を報告している。

Saitoh and Ono⁽⁶⁾およびSaitoh *et al.*⁽⁷⁾は、平板型スカイラジエータと大型の地下蓄冷タンクによる季間蓄冷によって高温・多湿な日本においても放射冷却によって冷熱源を得ることが可能であることを報告している。また、田澤ら⁽⁸⁾⁽⁹⁾は種々の薄膜型選択放射材料の理論設計および放射冷却シミュレーションを行い、放射冷却の促進手法を提案している。さらに、Saitoh and Suzuki⁽¹⁰⁾は CPC(Compound Parabolic Concentrator)型ソーラーコレクタをスカイラジエータに転用することによって、従来の平板型スカイラジエータよりも放射冷却性能が向上することを実証している。

本報では、放射冷却現象による冷熱源の製造を目的としたスカイラジエータの冷却性能向上をはかるため、まず、2次元CPC型スカイラジエータについて、光学的な放射収支に基づく数値シミュレーションにより、リフレクタ形状を決定する設計パラメータである許容入射半角およびトランケーションの最適値を求めた。さらに、その妥当性を検証するため、シミュレーション結果に基づいて試作器を作成し、実際の気象条件下で冷却性能試験を行った結果について報告する。

*1 東北大学大学院工学研究科教授
(〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉01)

e-mail : saitoh@cc.mech.tohoku.ac.jp

*2 北陸電力(株) (〒930-8686 富山市牛島町15-1)

*3 東北大学大学院工学研究科助手
(原稿受付: 2002年8月15日)

2. 大気放射強度分布とCPC型スカイラジエータの原理

図1には、Landro and McCormickの文献⁽¹¹⁾に示されているBell *et al.*⁽¹²⁾による米国フロリダにおいて測定された大気放射の波長分布および天頂角分布を示す。7~14 μm以外の波長域では、大気放射は気温と同じ温度の黒体放射にほぼ一致している。これは、この波長域に水蒸気と二酸化炭素の強い吸収が存在しているためである。一方、7~14 μmの波長域では大気放射は気温と同じ温度の黒体放射よりも小さくなっている。この比較的透明な波長域を大気の窓(Atmospheric window)と呼ぶが、水蒸気による弱い吸収がなおも存在している。また、9.6 μmの狭いピークはオゾンによるものである。大気の窓領域において、天頂角が大きくなると大気放射は増加するが、これは天頂角が大きくなればなるほど地表面付近のより高温の大気層からの入射になるためである。

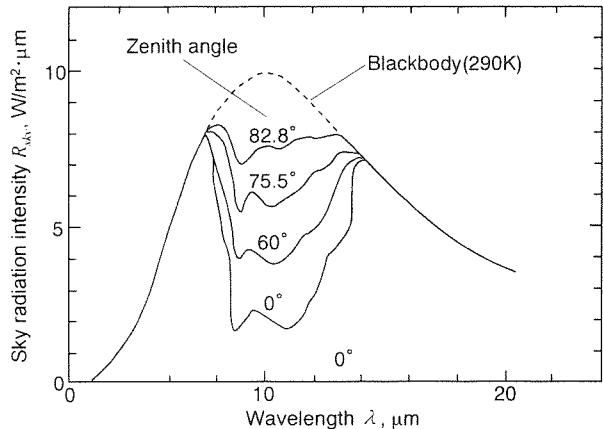


Fig.1 Relationship between distribution of sky radiation intensity and zenith angle⁽¹²⁾

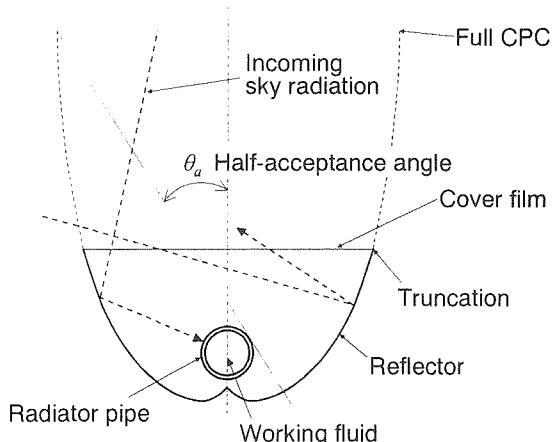


Fig.2 Cross section of CPC sky radiator (Cusp type)

このように地球の大気は、大気の窓領域で比較的透明であるため、地球上の物体からの熱放射のうち、この窓領域にあるもの一部が宇宙空間へ失われる。通常の気温のもとでは、大気の窓領域に放射強度のピークが存在

し、熱放射の30%程度が大気の窓領域にあるため、適当な大気条件のもとでは冷却が生じる。これが放射冷却現象である。

図2にCPC型スカイラジエータの原理としてCusp型の2次元CPCスカイラジエータの反射板(以下、リフレクタ)および放熱管の断面形状を示す。CPC型では、リフレクタの設計パラメータである許容入射半角(Half-acceptance angle) θ_a より小さな角度で入射する放射は全て放熱管に集束するが、 θ_a より大きな角度で入射する放射は全てリフレクタにより反射され、再び外部へと放射される。また、底部にインボリュート形状を併せ持つ本タイプは放熱管からの放射の全てをリフレクタで反射し、天頂方向へ向けて放出する特性を有する。

言い換えると、CPC型では放熱管からの放射は全て天頂方向に放出される一方、天頂角の大きい、つまり大気放射強度の大きな地表面に近い角度から入射する大気放射を遮断する特性を有することになる。したがって、大気と放熱管との放射熱交換は天頂方向の限られた領域、しかも大気放射強度の小さな領域とのみ行うこととなり、大気から入射する放射量が減少するため、正味のスカイラジエータの放射冷却量が増大すると考えられる。

なお、同様の効果は、CPC曲線を直線で近似した平板リフレクタを利用した光学系でも近似的に得ることができるが、CPC型の方が光学的に優れているため、本研究ではこれを採用する。

3. CPCリフレクタ形状の最適設計

本節では光学的な放射収支の数値シミュレーションを行い、2次元CPC型スカイラジエータのCPCリフレクタ形状の設計パラメータである許容入射半角およびトランケーション(切頭)の最適値を決定する。

スカイラジエータの放射冷却性能 P_{SR} [W/m²]は放熱管の表面における熱収支を考えて、次式で表すことができる。

$$P_{SR} = (Q_{out} - Q_{in}) / A_e \quad (1)$$

ここで、 Q_{out} は放熱管自身の熱放射量で、放熱管の平均表面温度、表面積および放射率をそれぞれ T_c 、 A_c および ε_c とすると、

$$Q_{out} = \varepsilon_c \sigma T_c^4 A_c \quad (2)$$

と表される。 Q_{in} は放熱管に入射する放射量であり、大気放射の入射角に応じて、リフレクタを経由して入射するもの、直接放熱管に入射するもの、さらにリフレクタ自身の熱放射などがあり、一概には表現できない。そのため、 Q_{in} の導出には後述するレイトレース(光線追跡)による放射伝熱解析が必要となる。なお、 σ はStefan-Boltzmann定数、 A_c はCPC開口部面積である。

3.1 大気放射量の推定式

大気放射は、波長 λ と天頂角 θ に依存するが、方位角には依存しないと考えられる。波長と天頂角の関数である放射強度 $R_{sky}(\lambda, \theta)$ は、大気放射率 $\varepsilon_{sky}(\lambda, \theta)$ を用いて次式で与えられる。

$$R_{sky}(\lambda, \theta) = \varepsilon_{sky}(\lambda, \theta) I_{b,a}(\lambda) \quad (3)$$

ここで、 $I_{b,a}(\lambda)$ [W/(m²·μm)]は大気温度 T_{air} [K]での黒体放射強度で、プランクの公式に基づいて次式で与えられる。

$$I_{b,a}(\lambda) = \frac{C_1}{\lambda^3} \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T_{air}}\right) - 1 \right]^{-1} \quad (4)$$

ただし、上式での C_1, C_2 は、Duffie and Beckmann⁽¹³⁾により次のように与えられる。

$$\begin{aligned} C_1 &= 2\pi hc^2 = 3.7405 \times 10^{-16} \text{ m}^2 \text{W} \\ C_2 &= hc/k = 0.0143849 \text{ mK} \end{aligned}$$

一方、Martin and Berdahl⁽¹⁴⁾らは、米国での緯度・経度の異なる6つの地点における測定と理論により、快晴のときの放射率 $\varepsilon_{sky}(\lambda, \theta)$ を大気の平均的放射率 ε_{sky} に関連させて表す方法を提案した。彼らによると、全波長領域について積分した放射率 $\varepsilon_{sky}(\theta)$ は ε_{sky} を用いて次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \varepsilon_{sky}(\theta) &= 1 - (1 - \varepsilon_{sky})(1.493\varepsilon_{sky} - 0.867)\exp[(1.124\varepsilon_{sky} \\ &\quad + 0.6)\left(1.7 - \frac{1}{\cos\theta}\right)] \end{aligned} \quad (5)$$

快晴時における平均的放射率 ε_{sky} の実験式は同じく Martin and Berdahl⁽¹⁴⁾による次式を用いる。

$$\varepsilon_{sky} = 0.711 + 0.56 \times 10^{-2} t_{dp} + 0.73 \times 10^{-4} t_{dp}^2 \quad (6)$$

ここで、 t_{dp} は外気の露点温度 [°C] である。ただし、雲量は0と仮定する。以上より、式(3)を全波長領域で積分すると、天頂角度のみに依存する大気放射量 $R_{sky}(\theta)$ が次式で表される。

$$R_{sky}(\theta) = \varepsilon_{sky}(\theta) \int_0^\infty I_{b,a}(\lambda) d\lambda = \varepsilon_{sky}(\theta) \sigma T_{air}^4 \quad (7)$$

以上より、外気温と湿度から平均的放射率 ε_{sky} と大気放射率 $\varepsilon_{sky}(\theta)$ ならびに $R_{sky}(\theta)$ を求めることができる。図3は、表1に示す夏期と冬期の代表的な気象条件を与えたときの $\varepsilon_{sky}(\theta)/\varepsilon_{sky}$ の天頂角依存性を計算した結果である。これにより、 $\varepsilon_{sky}(\theta)/\varepsilon_{sky}$ は天頂角の大きい領域で大きい傾向になることがわかる。また、夏期と冬期では、天頂角の大きい領域において若干の差異がある。

なお、この方法によって計算される $R_{sky}(\theta)$ を全天で積分して得られる全天大気放射量 R_{sky} と仙台における実測値は、季節を問わず、おおむね一致することを筆者らは予め確認している。

Table 1 Typical climatic conditions in summer and winter

	Summer	Winter
Ambient Temperature [°C]	21	0
Relative Humidity [%]	80	40
Cloudiness	0	0

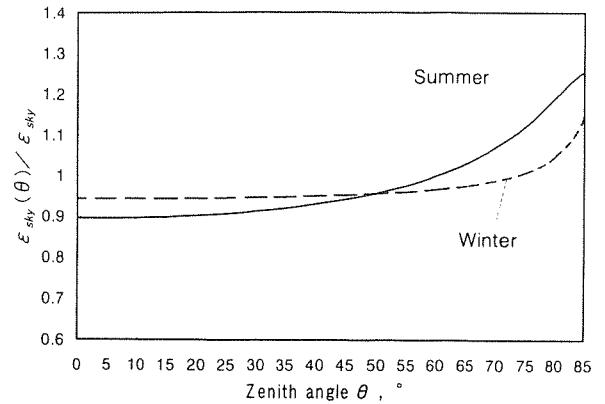


Fig.3 Calculation result of atmospheric emissivity vs. zenith angle in summer and winter

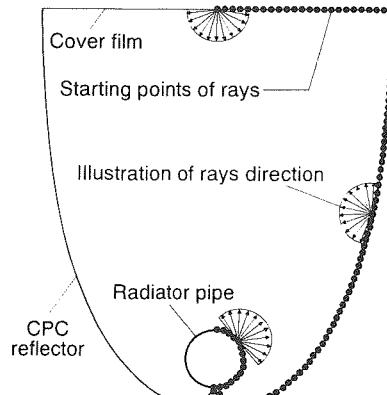


Fig.4 Illustration of the ray tracing (in case of $\theta_a = 30^\circ$)

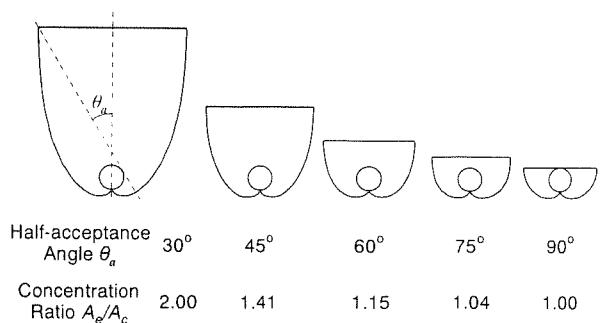


Fig.5 Simulation models of CPC sky radiator

Table 2 Optical properties of each constituent element

	Emmitance Absorptance	Reflectance	Trans- mittance	Reflection
Radiator pipe	1	0	0	diffusive
Reflector	0	1	0	mirroring

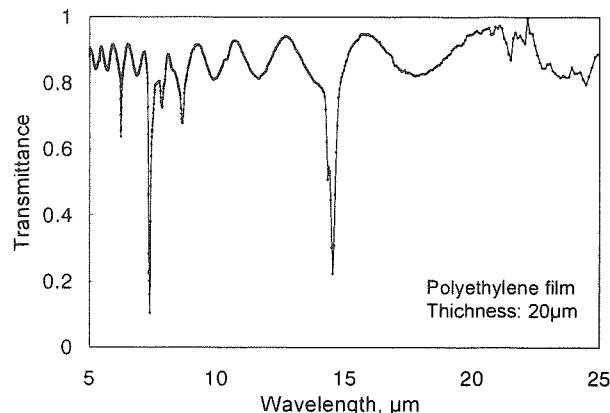


Fig.6 Result of spectroscopic analysis of Polyethylene film

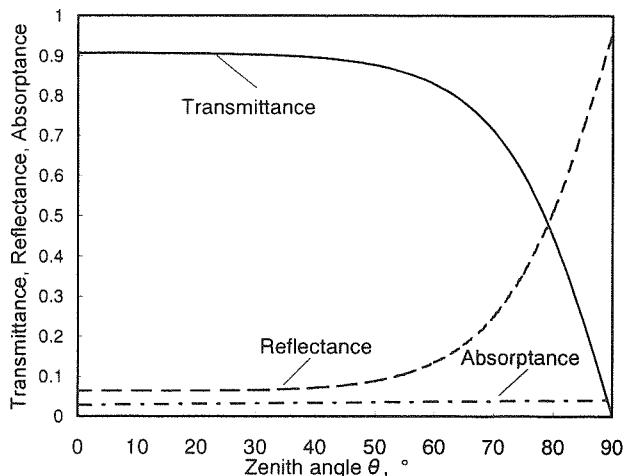


Fig.7 Optical properties of polyethylene film for directional radiation

3.2 レイトレースによる放射収支シミュレーション

CPC型スカイラジエータの熱収支を解析するうえで、各構成要素間の放射熱伝達は非常に複雑な様相を示す。そこで各構成要素面から一様に光線を発射し、その光線を追跡する光線追跡(Ray trace; レイトレース)を行うことにより、スカイラジエータの放射熱収支を解いて、冷却性能 P_{SR} を求める。

図4に許容入射半角 $\theta_a=30^\circ$ のCPC型スカイラジエータの各構成要素から光線を出すモデル図を示す。カバー部分は50点、放熱管、リフレクタには100点を等間隔に採り、各々の点から接線方向に対して 5° おきに出た計36本の光線の軌跡をそれぞれ追跡することによって各構成要素間の放射のやり取りを計算した。

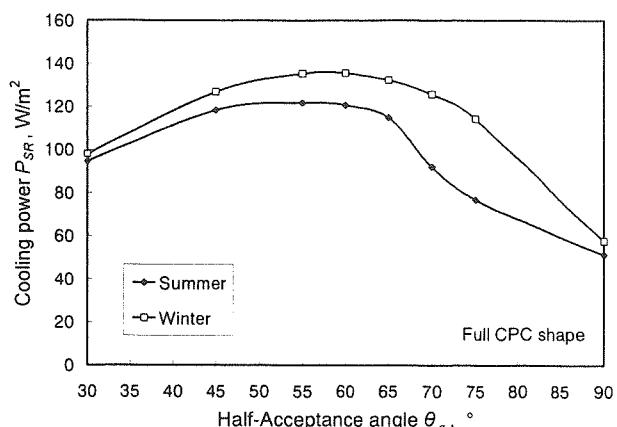
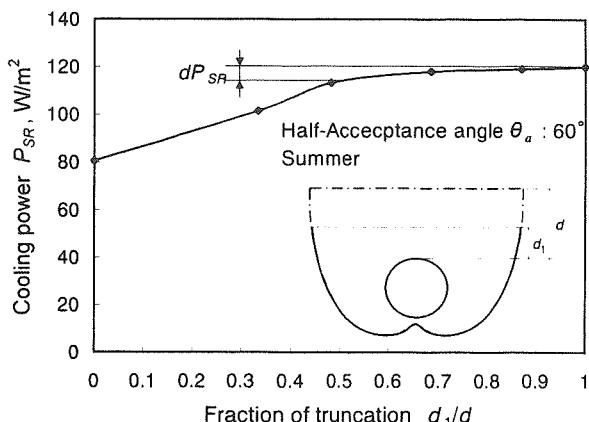
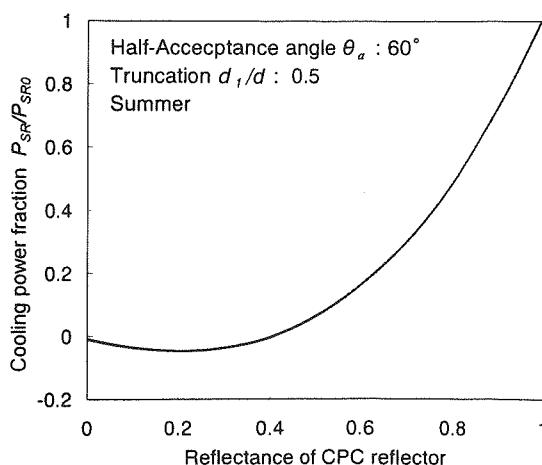
Fig.8 Cooling power simulation result of CPC sky radiator (Relationship between P_{SR} and θ_a)Fig.9 Cooling power simulation result of CPC sky radiator (Relationship between P_{SR} and d_1/d)Fig.10 Effect of reflectance of CPC reflector (Relationship between P_{SR}/P_{SR0} and reflectance)

図5にはレイトレースを行ったスカイラジエータのモデルを示す。各構成要素の反射率と反射形態は、まず、表2に示すように簡単のため理想的に設定した。次いで、リフレクタの反射率が1未満の場合についても、レイトレースを行った。

3.3 シミュレーション結果

CPC型スカイラジエータにおいては、リフレクタおよび放熱管を保護し、かつリフレクタキャビティ内で安定温度成層を形成し冷却効果を高めるためにカバーが望ましい。カバー材料については、大気の窓領域において高透過性を有するポリエチレンフィルム(PEフィルム)を用いるものとした。

図6に実際に後述の実験で用いた厚さ20μmのPEフィルムの分光特性を示す。ごく限られた吸収帯を除き、PEフィルムは本研究において対象となる赤外領域において高透過性を有する。PEフィルムの平均的な透過率、反射率および吸収率(放射率)の入射角度に対する変化を図7示す⁽¹³⁾。

まず、リフレクタの反射率を1と仮定した場合についてシミュレーションを行う。図4のカバー部分の各点から出る光線の角度に応じて $R_{sky}(\theta)$ に図7に示すPEフィルムの透過率が乗せられる。この光線を追跡し、最終的に放熱部に入射する放射量 Q_{in} が積算される。その後、カバー、リフレクタおよび放熱部における放射熱収支がバランスする条件での各表面温度を反復法により計算し、最終的に式(1)より P_{SR} が求められる。

図8に許容入射半角 θ_a に対する冷却能力 P_{SR} の変化を示す。ただし、ここでは対流および熱伝導による影響は考慮していない。これより、 θ_a が60°を超えた辺りから急激に性能が落ちることがわかった。これはリフレクタおよびカバーフィルムの透過性によって大気放射の入射が減少する量に比べ、放熱管から放出された熱放射がカバーフィルムによって反射して自身に戻ってくる量の方が大きくなるためである。結果として、夏期の気象条件では最適な θ_a は55°付近、冬の気象条件では60°付近に冷却性能のピークが現れる。図8はフルCPC形状の場合の結果であるが、CPC型ソーラーコレクタにおいては、製造コストを削減するために適当なトランケーション(切頭)を行うことがあるため、ここでは、トランケーションが冷却性能におよぼす影響について同様のシミュレーションを行った。

図9に $\theta_a=60^\circ$ のCPC形状のリフレクタをトランケーションした場合の冷却量の変化について示す。なお、トランケーションの割合は、図9中に示す d_1/d で表す。つまり、トランケーションのないフルCPC形状を1、放熱管の最上部が見える高さまで切頭した場合を0として定義する。この結果により、 θ_a が60°の場合は、トランケーションを行わないとき、すなわち $d_1/d=1$ のときがもっとも冷却性能に優れることがわかった。しかしながら、実際の製作上のコストならびに軽量・薄型化的観点からは、性能が著しく犠牲にならない範囲でトランケーションを行う方が望ましい。図9によると $d_1/d=0.5$ までトランケーションしても冷却性能の低下(図9中の dP_{SR})はフルCPC形状の場合の7%未満であり、これを本研究における最適値としたい。

以上の解析では、リフレクタの反射率を1と仮定していたが、実際の製作上、リフレクタの反射率は0.8~0.9程度になるものと思われるため、反射率を変化させた場合についても、同様のシミュレーションを行った。この場合、追跡した光線がリフレクタで反射する際には光線の有する放射量にリフレクタの反射率が乗せられ、反射されなかつた放射量がリフレクタに吸収されるものとした。さらにリフレクタ自身からの放射を同様に光線追跡し、放熱部への入射量 Q_{in} を算出した。

図10は $\theta_a=60^\circ$ の場合において、反射率を変化させたときの冷却性能 P_{SR} の変化を示すもので、縦軸は反射率が1のときの冷却性能 P_{SR0} に対する比率である。これより反射率の低下は冷却性能を著しく低下させることがわかる。他の θ_a についてもほぼ同様の結果となり、実際の製作で得られる反射率0.8~0.95の場合は、結局、 $\theta_a=55^\circ \sim 60^\circ$ 付近がもっとも冷却性能が高くなつた。

4. 冷却性能実験

前節のシミュレーション結果より、季節によって若干の変化はあるものの、CPC型スカイラジエータの放射収支上の最適設計値として $\theta_a=60^\circ$ 、トランケーションの割合 $d_1/d=0.5$ が得られた。この設計値に基づく改良型CPC型スカイラジエータを試作し、これまでのものと冷却性能比較実験をすることによって、シミュレーション結果の妥当性および改良型CPC型スカイラジエータの基本性能を明らかにする。

図11にCPC型スカイラジエータの実験装置の概略を示す。CPC型スカイラジエータは放熱板と通水管を兼ねる銅管(高輻射率黒色塗装、放射率0.95)とCPC形状リフレクタ(反射率0.94)およびカバーから成り、1.6mのリフレクタ7本で1モジュールを形成する。1モジュールの開口部有効面積は0.96 m²である。また、リフレクタの周囲、および背面にはウレタンフォームおよびグラスウールによって断熱がなされている。

図12に実験装置の写真を示す。実験は本学の研究棟屋上にて行った。装置周辺に障害物等は無く、全天が見渡せる環境である。熱媒体としては不凍液(エチレングリコール水溶液、濃度22.5wt%)を用いる。熱媒体の流量を一定に保つため、スカイラジエータへの熱媒体の循環には上部タンクのヘッドのみを利用して循環を行っている。表3に各構成部材および熱媒体の熱物性値を示す⁽¹⁵⁾。

比較のために、ソーラーコレクタ用に設計・製作されたCPC型リフレクタを用いたスカイラジエータを並べて設置した。このソーラーコレクタ用CPC型リフレクタの許容入射半角 θ_a は32°、トランケーションの割合 d_1/d は約0.25であり、本シミュレーションによって得られた最適設計値とはだいぶ異なる設計となっている。比較にあたり、開口部有効面積は改良型と同じになるよう1.6mのリフレクタ5本で1モジュールとした。

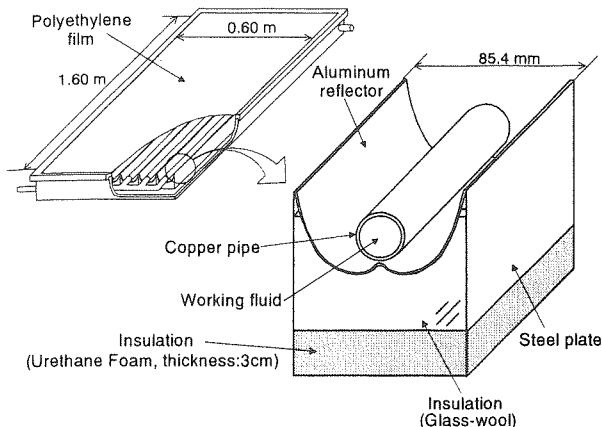


Fig.11 Illustration of improved CPC sky radiator

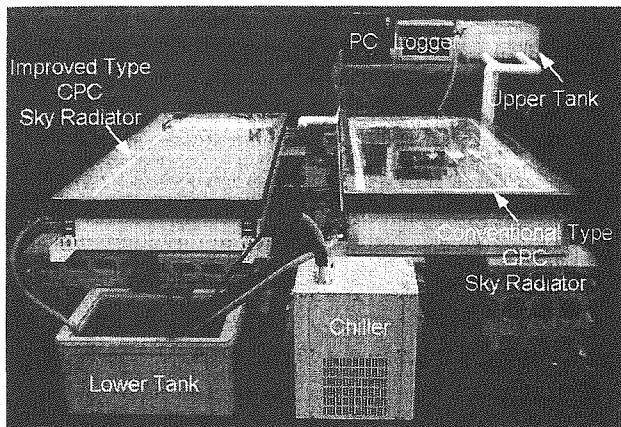


Fig.12 Photo of the experimental apparatus

Table 3 Thermophysical properties^{*}

Material	Specific gravity kg/m ³	Specific heat kJ/(kg·K)	Thermal conductivity W/(m·K)
Water	999.8	4.213	6.562
Ethylene Glycol	1060	3.798	0.256
Aluminum	2690.7	0.8808	235.93
Copper	8917.6	0.3806	401.22
Urethane foam	33.26	1.129	0.034
Glass wool	16	0.0502	0.00246

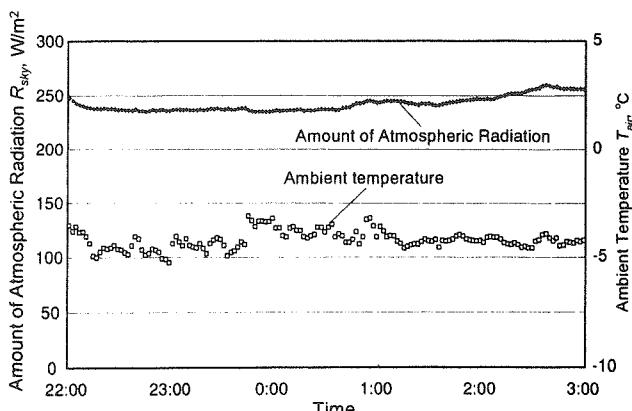
^{*}Reference temp.: 0°C

Fig.13 Time variations of temperature and amount of atmospheric radiation (Data: January 19, 2001)

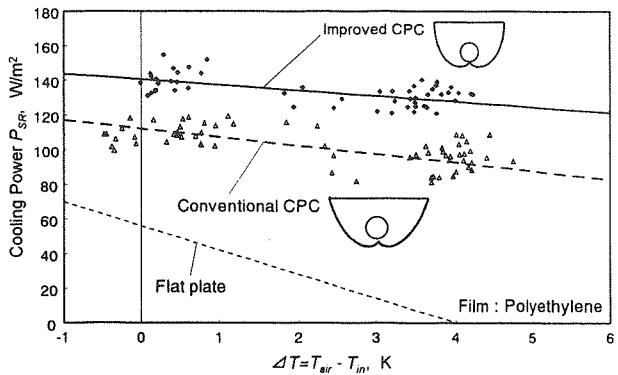
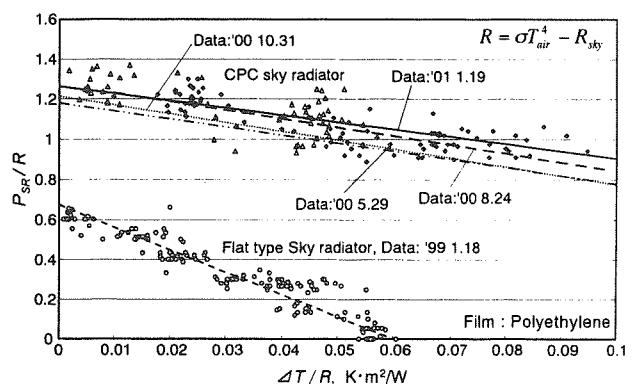


Fig.14 Experimental cooling power (Comparison between improved CPC sky radiator and conventional one)

Fig.15 Universal plot using P_{SR}/R and $\Delta T/R$ for several experimental data under different atmospheric conditions

カバーフィルムについては図6に示したPEフィルムを用いた。スカイラジエータの入口と出口の熱媒体の温度差に流量と熱媒体の比熱を乗じることにより冷却量とし、これを開口部有効面積で除して単位面積あたりの冷却性能とした。流量は各々 1 ℓ/min で行った。

図13に実験時の気象データとして外気温と大気放射量の経時変化を示す。外気温の平均は -4.2°C とかなり低かったが大気放射量は平均で 242 W/m²で安定していた。この時間帯は雲量も常に0で風のほとんどない気象条件であった。

図14は、横軸に外気温 T_{air} とスカイラジエータ入口温度 T_{in} との温度差 ΔT を、縦軸に冷却性能をとった結果である。この結果により、本シミュレーションにより求めた改良型CPC型スカイラジエータがソーラーコレクタ用のものと比べて30%程度の冷却性能の向上が図られている。なお、図14中には、参考までに同時期に行った平板型スカイラジエータの実験結果もプロットしてある。

5. 放射冷却性能曲線の整理手法の提案

これまでスカイラジエータにはソーラーコレクタの集熱効率曲線に相当する整理手法が提案されていなかった。これは、ソーラーコレクタの場合の日射量にあたるパラメータが確定していないためである。スカイラジエータの場合、日射量に相当するパラメータは大気放射量と思われるが、単に大気放射量で冷却性能を除しても論理的な解釈は成立しない。前述の式(1)および式(2)では、放射収支のみを考慮したが、これに熱損失の項を付加すると、放射冷却性能 P_{SR} はあらためて次式で与えられる。

$$P_{SR} = \varepsilon_c \sigma T_c^4 \frac{A_c}{A_e} - q_{in} - U \Delta T \quad (8)$$

ここで、右辺第1項は、放熱部からの熱放射量であり、第2項は、 $q_{in}=Q_{in}/A_e$ で、大気放射およびリフレクタからの放射などの放熱部へ入射する放射量である。また、第3項について、 U は総合熱通過率、 ΔT は $T_{air} - T_{in}$ である。

式(8)において、 $\varepsilon_c=1$ 、 $T_c=T_{air}$ 、 $A_c/A_e=1$ 、 $q_{in}=R_{sky}$ および $\Delta T=0$ とおいた量 R を考えると、

$$R = \sigma T_{air}^4 - R_{sky} \quad (9)$$

となる。このとき R は、表面平均温度 T_{air} の黒体平板型スカイラジエータが、 R_{sky} なる全天平均大気放射量に晒されたときの正味の放射冷却量であり、黒体平板型スカイラジエータに気温と等しい温度の熱媒体を循環させたときの放射収支上の理論冷却性能を示している。この R は、気象条件によってのみ決定される量であり、 R をソーラーコレクタにおける日射量に相当する量と仮定すると、式(10)の両辺を R で除して、

$$\begin{aligned} \frac{P_{SR}}{R} &= \frac{\varepsilon_c \sigma T_c^4 \frac{A_c}{A_e} - q_{in}}{R} - U \frac{\Delta T}{R} \\ &= P - U \frac{\Delta T}{R} \end{aligned} \quad (10)$$

と表される。すなわち、切片 P は実際の放射冷却量の R に対する比となる。CPC型などの大気放射の遮蔽効果があるスカイラジエータでは、 q_{in} が小さくなるため、場合によっては、切片 P は1を超えることがあり得るため、ソーラーコレクタの集熱効率の概念よりもヒートポンプなどの成績係数の概念に近いものとなる。なお、ここでは $R>0$ の場合のみを考える。

実験により、 P_{SR} 、 R および ΔT については知ることができるので、このデータ整理の手法を用いて大気放射量、光学性能および断熱性能について異なった条件下でも同グラフ上に整理することができる。

この整理手法に基づいて、改良型CPC型スカイラジエータについて異なる気象条件で行った実験データを整理した結果を図15に示す。比較のため平板型スカイラジエータの実験データも重ねて示す。ただし、実験はいずれも風の穏やかな日に行っている。

図15より、CPC型スカイラジエータのデータ整理結果について、プロットデータには若干のバラツキが見られるものの、気象条件の異なる実験結果をプロットしたことを考えると、提案した整理方法には妥当性があると考えられる。また、この図より、改良型CPC型スカイラジエータは、平板型スカイラジエータとの比較において、切片 P で約2倍の冷却性能の差が見られ、傾きとして示される総合熱通過率 U においてもCPC型スカイラジエータが優れているという結果が得られた。なお、図15の横軸は、代表的な総合熱通過率 U_0 を乗ずることによって無次元表示とすることもできる。

6. 結 言

本報では、スカイラジエータのさらなる性能向上を目的として、2次元CPC型スカイラジエータのリフレクタ形状を決定する設計パラメータである許容入射半角およびトランケーションの最適設計をレイトレースによる放射収支シミュレーションによって決定し、さらに最適設計値に基づく試作器を製作し、検証実験を行い、以下の知見を得た。

- 1) 2次元CPC型スカイラジエータでは、季節による若干の変化はあるものの、許容入射半角 $\theta_a=60^\circ$ 付近で冷却性能のピークを持つことがわかった。
- 2) 許容入射半角 θ_a が 60° の場合、トランケーションを行わないときに最も冷却性能に優れるが、 $d_1/d=0.5$ までトランケーションしても冷却性能の低下はフルCPC形状の場合の7%未満であり、製作上のコストならびに軽量・薄型化的観点から、これをトランケーションの最適値とした。
- 3) シミュレーションにより求めた改良型CPC型スカイラジエータを試作し、冷却性能実験を行った結果、ソーラーコレクタ用のCPC型リフレクタを用いたものに比べて、およそ30%程度の性能向上が認められた。
- 4) 放射冷却性能実験結果の新たな整理手法として、 P_{SR}/R vs. $\Delta T/R$ を用いることを提案した。これにより、気温、大気放射量および熱損失量も加味した整理が可能となつた。

記号表

A_e	:CPC開口部面積(m^2)
A_c	:放熱部面積(m^2)
C_1	:定数(W/m^2)
C_2	:定数(mK)
d	:図10に示す長さ(m)
d_1	:図10に示す長さ(m)
$I_{b,d}(\lambda)$:黒体放射強度($W/m^2 \cdot \mu m$)
P	:式(12)の切片
P_{SRO}	:リフレクタ反射率1での冷却性能
P_{SR}	:冷却性能(W/m^2)
Q_{in}	:入射量(W/m^2)
Q_{out}	:放射量(W/m^2)
q_{in}	: Q_{in}/A_e
R_{sky}	:全天大気放射量(W/m^2)
$R_{sky}(\theta)$:大気放射量($W/m^2 \cdot sr$)
$R_{sky}(\lambda, \theta)$:大気放射量($W/m^2 \cdot sr \cdot \mu m$)
R	:式(11)
T_{air}	:外気温
T_c	:放熱部表面温度(K)
T_{dp}	:露点温度(°C)
T_{in}	:ラジエータ入口温度(K)
ΔT	: $T_{air} - T_{in}$ (K)
U	:総合熱通過率($W/m^2 \cdot K$)
v_c	:放熱部の放射率
v_{sky}	:見かけの大気放射率
$v_{sky}(\theta)$:大気放射率
$v_{sky}(\lambda, \theta)$:大気放射率
σ	:Stefan-Boltzmann定数
θ_a	:許容入射半角(rad)
θ	:天頂角(rad)
λ	:波長(μm)
π	:円周率

- (9) 田澤真人,金平,種村栄,“VO₂系サーモクロミック膜を組み合わせた新規の選択放射材料”,太陽エネルギー,vol.22(1996),pp.51-57.
- (10) T.S.Saitoh and M.Suzuki, “Sky Radiation Cooling by using Compound Parabolic Concentrator”, Proc. of the 34th IECEC(1999), CD-ROM.
- (11) B.Landro and P.G.McCormic, “Effect of Surface Characteristic and Atmospheric Condition on Radiative Heat Loss to a Clear Sky”, Int. J. Heat Mass Transfer, 23 (1980), pp.613-620.
- (12) E.E. Bell, L.Einsner, J.Young and R.A.Oetjen, “Spectral Radiance of Sky and Terrain at Wavelength between 1 and 20 Micron II Sky Measurements”, J. Opt Soc. Am., 50 (1950), pp.1313-1320.
- (13) J.A.Duffie and W.A.Beckmann, “Solar Engineering of Thermal Processes”, John Wiley & Sons, Inc., New York (1980).
- (14) M.Martin and P.Berdahl, “Summery of Results from Spectral and Angular Sky Radiation Measurement Program”, Solar Energy, vol.33, No.3/4 (1984), pp.241-252.
- (15) ハンドブック編集委員会：熱物性ハンドブック，養賢堂 (1990)

参考文献

- (1) C.C.Granqvist and A.Hjortsberg, “Radiative Cooling to Low Temperatures : General Considerations and Application to Selectively SiO Films”, Applied Physics, vol.52 (1981), p.4205.
- (2) C.C.Granqvist, “Radiative Heating and Cooling with Spectrally Selective surfaces”, Applied Optics, vol.20 (1981), p.2606.
- (3) S.Catalanotti, V.Cuomo, G.Piro, D.Ruggi, V.Silivestrini and G.Troise, “The Radiative Cooling of Selective Surfaces”, Solar Energy, vol.17 (1975), p.83.
- (4) B.Bartoli, S.Catalanotti, B.Coluzzi, V.Cuomo, V.Silivestrini and G.Troise, “Nocturnal and Diurnal Performances of Selective Radiators”, Applied Energy, vol.3 (1977), p.267.
- (5) R.Lazzarin, “On Natural Radiative Cooling”, la thermotecnica, vol.18 (1979), p.345.
- (6) T.S. Saitoh and T. Ono, “Utilization of Seasonal Sky Radiation Energy for Space Cooling”, Trans. ASME Journal of Solar Energy Engineering, vol.106 (1984), pp.403-407.
- (7) T.S.Saitoh, H.Matsuhashi and T.Ono, “An Energy-Independent House Combining Solar Thermal and Sky radiation Energies”, Solar Energy, vol.135, No.6 (1985), pp.541-547.
- (8) 田澤真人,吉村和記,三木健,種村栄,“Si及びAlの無機化合物膜を用いた選択放射冷却能のシミュレーション”,太陽エネルギー,vol.19 (1993), pp.39-46.