

# 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2報：3次元CPC型スカイラジエータの提案および性能試験)

Cooling Power Enhancement of CPC (Compound Parabolic Concentrator) Sky Radiator  
(2nd Report ; Optimal Design and Experiment for 3-D CPC Sky Radiator)

齊藤武雄 \*1  
Takeo S. SAITO

高橋純 \*2  
Jun TAKAHASHI

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. In the 1st report, we have optimized a 2-D geometry of the CPC sky radiator and demonstrated that the improved CPC sky radiator has a greater performance of cooling power than the conventional one.

In this paper, we propose new type CPC sky radiator with 3-D geometry, which is expected to have best cooling performance. General design of 3-D CPC sky radiator and experimental verification were done in this article. The results demonstrate that the new type 3-D CPC sky radiator shows much better cooling performance than the 2-D CPC sky radiator.

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、冷却性能試験

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

## 1. 緒言

近年、大気中の二酸化炭素( $\text{CO}_2$ )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。とくに都市温暖化では、夏期における冷房排熱による寄与が大きいと考えられており、今後、熱をどのように棄てるかが課題となっている。自然エネルギーの1つである放射冷却現象(Sky radiation cooling)は、熱を宇宙に棄てることを原理としており、これをうまく利用して、冷熱源を確保することができれば、冷房排熱を軽減できる可能性がある。放射冷却を利用して熱を宇宙に棄てることにより冷水を得る装置はスカイラジエータ(Sky radiator)と呼ばれ研究がなされている<sup>(1)~(6)</sup>。

第1報<sup>(7)</sup>では、スカイラジエータの性能向上を目的として、CPC型ソーラーコレクタを転用したCPC(Compound Parabolic Concentrator)型スカイラジエータのリフレクタ形状の設計パラメータである許容入射半角とトランケーションの最適値を、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求め、そ

の値に基づいて実際に試作器を製作し、性能実験によってその有効性を検証した。

しかしながら、前報<sup>(7)</sup>におけるCPC型スカイラジエータはCusp型と呼ばれる樋状の2次元CPC形状であり、ソーラーコレクタのように太陽位置の変化を考慮する必要のないスカイラジエータにとっては未だ改善の余地があった。

そこで本報では、CPC型スカイラジエータのさらなる性能向上を目的として、お椀状のリフレクタ形状を有する3次元CPC型スカイラジエータについて提案し、理想的な光学系を仮定した数値シミュレーションによって、リフレクタ形状を決定し、それに基づく試作器の製作および性能試験を行って、新たに提案した3次元CPC型スカイラジエーションの有効性を検証した結果について報告する。

## 2. 3次元CPCリフレクタの導入

図1はRabl *et al.*<sup>(8)</sup>によるCPCの4つの基本タイプである。前報<sup>(7)</sup>では図1(d)に示すCusp型の2次元CPCスカイラジエータについて報告した。本報では、製作上の容易さを考慮し、図1(a)のCup型のCPC形状を中心軸周りに回転させた3次元CPC型のリフレクタ形状を有するスカイラジエータについて考える。

\*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 川崎製鉄㈱ (〒260-0835 千葉市中央区川崎町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)

図2は図1(a)のCup型を例にとったCPC型スカイラジエータの説明図である。図2に示すように、CPCは形状特有の許容入射半角(Half-acceptance angle:  $\theta_a$ )という設計パラメータをもち、 $\theta_a$ よりも小さい入射角で入射する放射は放熱部(ソーラーコレクタにおける受光部に相当する)に集束するが、 $\theta_a$ よりも大きい入射角で入射する放射は集束せずに反射し、外部へ放出されるという特性をもっている。一方、放熱部から出てリフレクタに入射する放射は全て反射し、外部へ放出されることになる。このとき、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は、リフレクタ外壁によって遮断されると同時に、 $\theta_a$ よりも大きな角度から入射するものはリフレクタにより反射される。

ゆえに、大気とスカイラジエータの放射のやり取り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による冷却量が増大することになる。なお、ソーラーコレクタ用のCPCリフレクタなどでは、適度なトランケーション(切頭)を行って、リフレクタの高さを調整することがある。本報では、トランケーションの割合を図2中の $H/H_{max}$ で表わすものとし、 $H/H_{max} = 1$ のときがフルCPCで、この値が小さいものほどトランケーションが大きいことになる。

図3(1),(2)および(3)に3次元CPC型、2次元CPC型および平板型における大気放射の入射領域の概略を示す。これより入射領域は、3次元CPC型では $\theta_a$ によって得られる立体角、2次元CPC型では平面角によって制限されるが、平板型では全天からの入射を受ける。この観点からスカイラジエータとしては3次元CPC型が最も望ましいと考えられる。なお、より簡単なリフレクタ形状としてCPC曲線を直線にしたCONE型の光学系においても、原理的にはほぼ同様な効果が得られるが、許容入射半角外からの入射に対して、CPC型の方が優れた遮蔽効果を有するため、本報ではこれを採用する。

2次元CPCおよび3次元CPCリフレクタのフルCPC形状における大気放射の入射比 $I_r$ および集光比 $C_r$ は表1のように求められる。ここで、大気放射の入射比 $I_r$ は、全天に対する各CPCの入射領域の面積比と定義する。また、集光比 $C_r$ は、CPCの開口部面積を受光部面積で除した値と定義される。表1の式に基づいて、具体的に許容入射半角 $\theta_a$ を与えると図4のようになる。大気放射の入射比 $I_r$ は2次元CPC型よりも3次元CPC型のほうが $90^\circ$ 未満のすべての $\theta_a$ において小さく、 $\theta_a$ が小さいほど差は大きくなる。一方で、 $\theta_a$ が小さくなると3次元CPC型では集光比が著しく増加する傾向にある。

このように、3次元集光系では、2次元集光系に較べて集光比が大きくなり、放熱部の面積が小さくなるため、

放熱量と大気放射の遮蔽効果とのバランスによっては、冷却性能が低下する可能性もあるので慎重な考察が必要である。

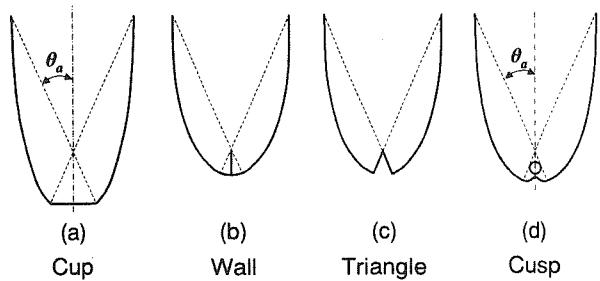
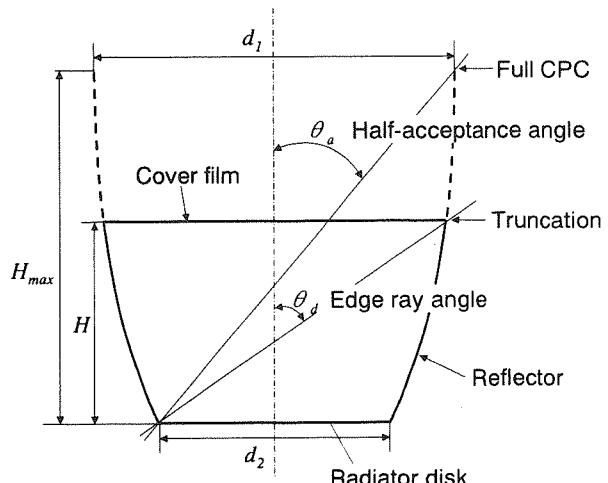
Fig.1 Various CPC shapes<sup>(8)</sup>

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

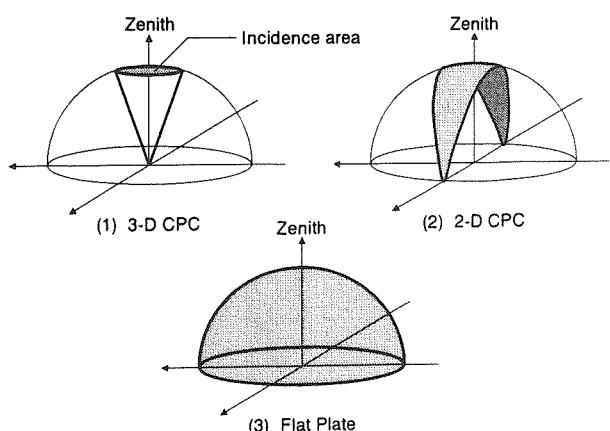


Fig.3 Incidence domain of atmospheric radiation for 3-D CPC, 2-D CPC and flat plate sky radiators

Table 1 Function of incidence ratio and concentration ratio for various CPC shapes

	Incidence ratio $I_r$	Concentration ratio $C_r$
2-D CPC	$2\theta_a/\pi$	$1/\sin\theta_a$
3-D CPC	$1 - \cos\theta_a$	$1/\sin^2\theta_a$

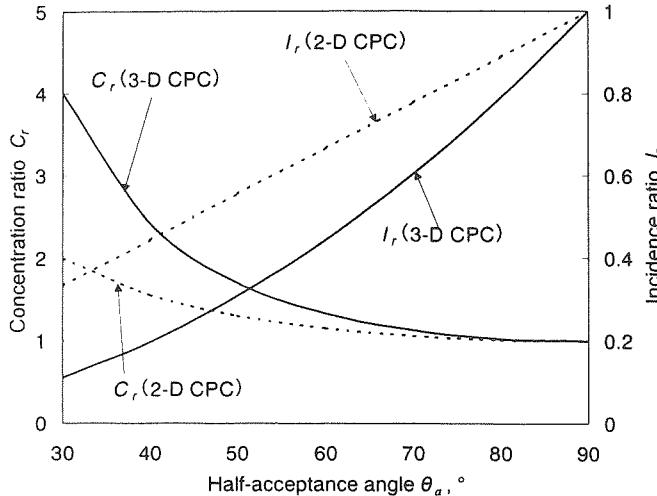


Fig.4 Calculation result of relation between atmospheric emissivity and zenith angle in summer and winter

### 3. 3次元CPCリフレクタの放射冷却性能シミュレーション

そこで、本報では、放熱部の放射率を1、リフレクタの反射率を1と仮定した理想的な光学系での放射収支に基づいて冷却性能シミュレーションを行い、3次元CPCリフレクタの設計パラメータである許容入射半角 $\theta_a$ およびトランケーションの割合 $H/H_{max}$ を導出する。

図6には、ある角度から入射する大気放射が放熱部に入射する割合 $A_f$ (Angular acceptance fraction)を示す。算出にはCarvalho *et al.*<sup>(8)</sup>のCPC型ソーラーコレクタに対する算出方法を用いた。許容入射半角(図6では $\theta_a=65^\circ$ )内からの大気放射は、リフレクタの反射率を1と仮定するすべて放熱部に入射するため、 $A_f = 1$ となる。トランケーションを行う場合は、許容入射半角外( $\theta_d - \theta_a$ )からリフレクタに当たらず直接放熱部に入射する大気放射も出てくるため、トランケーションが大きいものほど大気放射が放熱部に入射する割合は大きくなり、相対的にスカイラジエータの冷却能力は低下することになる。よって、大気放射の入射特性よりトランケーションは行わず、フル形状のものを使用するのが望ましいが、集光比を下げ、リフレクタの製造コストを削減するといった長所もあり、トランケーションを決定するときはこれらのバランスをとることが重要となる。

ある天頂角 $\theta$ からスカイラジエータの放熱部に入射する大気放射量 $Q_{sky}(\theta)$ は、その角度における大気放射強度 $R_{sky}(\theta)$ に、カバーフィルムの透過率 $\tau(\theta)$ および許容入射半角 $\theta_a$ とトランケーション率 $H/H_{max}$ により決定される大気放射の入射割合 $A_f(\theta)$ を乗じたものとなり次式で表される。

$$Q_{sky}(\theta) = R_{sky}(\theta) \tau(\theta) A_f(\theta) \quad (1)$$

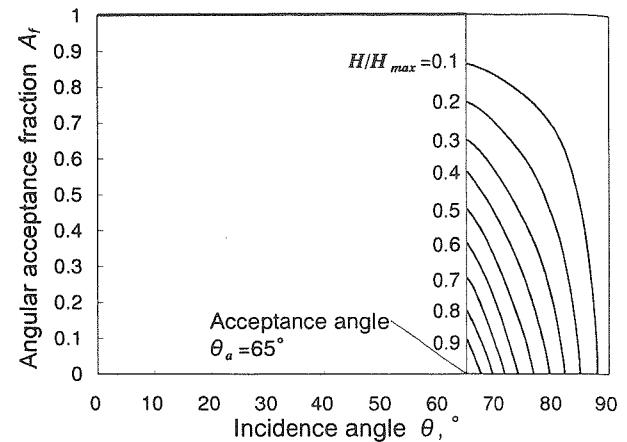


Fig.6 Angular acceptance fraction of CPC sky radiator

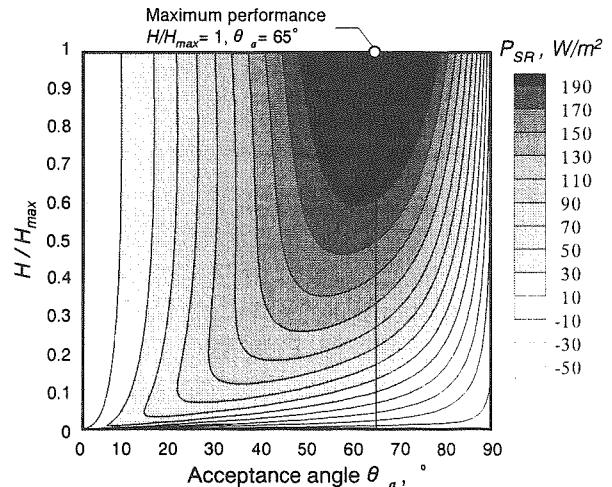


Fig.7 Cooling power simulation result of CPC sky radiator  
(Relationship among  $P_{SR}$ ,  $\theta_a$  and  $H/H_{max}$ )

よって、放熱部に入射する正味の大気放射量 $Q_{sky}$ は $Q_{sky}(\theta)$ を全天で積分したものとなる。また、スカイラジエータの冷却性能 $P_{SR}$ は次式で表される。

$$P_{SR} = \sigma T_c^4 / C_r - Q_{sky} \quad (2)$$

ここで、 $\sigma$ はStefan-Boltzmann定数( $5.67 \times 10^{-8}$  W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>)、 $T_c$ は放熱部の平均表面温度である。ただし、放熱部表面の放射率を1、リフレクタの反射率を1とする。カバーフィルムには前報<sup>(7)</sup>同様にポリエチレンフィルムを用いるものとし、透過率 $\tau(\theta)$ は前報で記述したものを用いる。また、 $R_{sky}(\theta)$ についても前報と同様の夏期の気象条件および算出式を用いた。

図7は $\theta_a$ と $H/H_{max}$ の変化に対する冷却性能 $P_{SR}$ のシミュレーション結果である。図内の曲線は冷却能力が等しい点を結んだ等冷却性能線である。これより、理想的な光学系での放射収支を考慮した場合の性能 $P_{SR}$ の最大値は、許容入射半角 $\theta_a = 65^\circ$ 、トランケーションの割合 $H/H_{max} =$

1. すなわちトランケーションを行わないフルCPC形状のときであることが明らかとなった。最大値は約190W/m<sup>2</sup>となつたが、これは放射特性のみを考慮した場合であり、対流、熱伝導による損失は考慮されていない。

図8は、このときの3次元CPC型リフレクタの断面図であるが(ただし、放熱部直径を25mmとした場合)、フルCPC形状でも高さは12mmと低く、トランケーションの必要性はないと判断した。

#### 4. 冷却性能実験

前節のシミュレーションでは、スカイラジエータとしての許容入射半角 $\theta_a$ およびトランケーションの割合を導出したが、理想的な光学系を仮定していたため、必ずしも最適値とは言えない。そこで、シミュレーション結果に基づいて試作器を製作し、前報<sup>(7)</sup>で報告した2次元CPC型スカイラジエータとの比較性能試験を行うことによって、3次元CPC型スカイラジエータの有効性を検証する。図9に試作した3次元CPC型スカイラジエータの実験装置の概略を示す。

3次元CPC型スカイラジエータは、放熱板(高輻射率黒色塗装、放射率0.95)と通水管を兼ねる銅管、3次元CPC形状リフレクタ、およびカバーからなる。リフレクタは図8に示したように、許容入射半角は65°、開口部の直径は27.6mmとなっており、トランケーションは行わずフル形状で使用する。反射面は基板のアルミニウムに蒸着処理を行うことにより、0.88の反射率を有する。このリフレクタを縦に8個、横に15個、計120個使用することによりモジュールを形成し、モジュールの開口部有効面積 $A_e$ は0.0915m<sup>2</sup>である。ここで、 $A_e$ は図10に示すようにモジュールに外接する長方形の面積であり、リフレクタ間の間隙(網をかけた部分)を含めた値である。

また、カバーには大気の窓領域の赤外放射を良く透過するポリエチレンフィルム(厚さ20μm、透過率0.9)を使用し、対流による熱損失を抑えている。そして、スカイラジエータの側面と背面は、それぞれ厚さ60mm、50mmのポリスチレンフォームおよびグラスウールを用いて十分に断熱する。

図11に3次元CPC型スカイラジエータ実験装置の写真を示す。実験は全天の望める本学の屋上にて、晴れた風の穏やかな夜を選んで行った。熱媒体には夏期または秋季には水を、冬期には不凍液(エチレングリコール水溶液、濃度22.5wt%)を用い、ポンプによりスカイラジエータ内を循環させている。この際、熱媒体の流量はもっとも安定して循環を行うことができる0.1ℓ/minとした。必要により、熱媒体の流入温度を温度調節器(チラー)を用いて変化させている。全天平均大気放射量 $R_{sky}$ の測定には精密赤外放射計を使用し、20分おきに計測した。また、実験中はタンクおよび配管周りを厳重に断熱した。

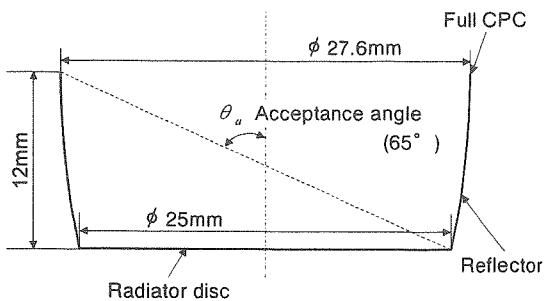


Fig.8 Cross section of optimal 3-D CPC sky radiator

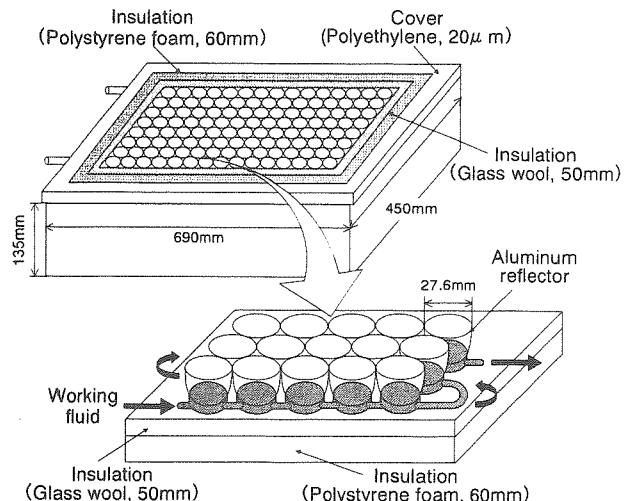


Fig.9 Illustration of the experimental apparatus

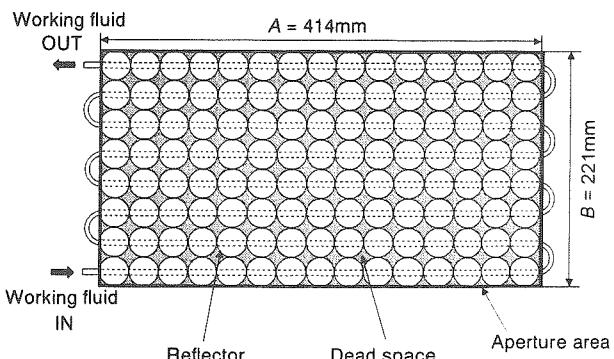


Fig.10 Illustration of 3-D CPC sky radiator module

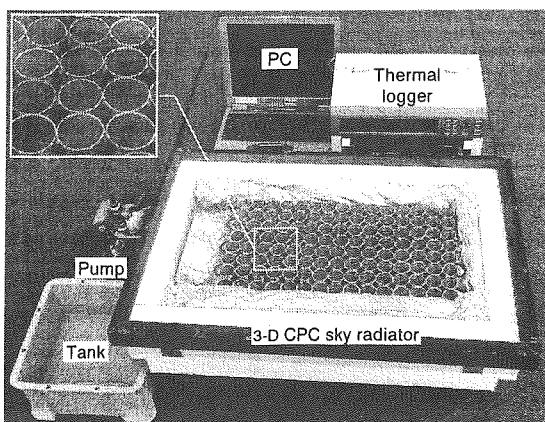


Fig.11 Photo of the experimental apparatus

Table 2 Thermophysical properties<sup>\*</sup>

Material	Specific gravity kg/m <sup>3</sup>	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

なお、比較対象として、前報<sup>(7)</sup>で述べた2台の2次元 CPC型スカイラジエータモジュールについても同時に冷却性能実験を行った。表2に各構成部材および熱媒体の熱物性値<sup>(9)</sup>を示す。

図12および図13に冷却性能試験の結果を示す。両日ともに雲がほとんどなく、放射冷却が起きやすい絶好のコンディションであった。大気放射量は一夜を通じてほぼ一定であったが、気温は夜明けが近づくにつれて徐々に下がり、実験開始時と比べて4°Cほど低下した。グラフの横軸に気温とスカイラジエータ入口における熱媒体の温度の差  $\Delta T$  をとり、縦軸に冷却能力  $P_{SR}$  をとっている。なお、前述の式(2)は外部との熱損失が無く、放射率および反射率を1とした場合の理想的な光学系における  $P_{SR}$  の式であるが、前報<sup>(7)</sup>でも述べたように、外部との熱損失を考慮した実際の冷却性能  $P_{SR}$  は、以下の式で表せる。

$$P_{SR} = \varepsilon_c \sigma T_c^4 \frac{A_c}{A_e} - q_{in} - U \Delta T \quad (3)$$

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、 $\Delta T$  は  $T_{air} - T_{in}$  である。

気温と熱媒体の温度が等しくなり、冷却が放射の形でのみ行われる  $\Delta T = 0$  K のときの冷却能力を最大冷却能力  $P_{max}$  とすると、この最大冷却能力は3次元CPC型が最も大きくなった。これは、図3に示すように、3次元CPC型は大気放射の入射領域が最も狭く、大気放射強度が大きい地表付近からの放射はリフレクタにより反射し放熱部へ到達しないが、2次元 CPC型では許容入射半角を設けていない長手方向から放射強度が大きい地表付近の大気放射が放熱部に入射するためと考えられる。また、グラフの傾きは、式(3)より熱通過率を表すが、とくに有意の差は見られず、 $\Delta T$  が大きい領域においても3次元CPC型が比較的高い冷却能力をもっていることがわかる。

図12および図13の実験結果を前報<sup>(7)</sup>で提案した黒体平板スカイラジエータの理論冷却性能  $R$  を用いた整理手法に基づいて再整理した結果を図14に示す。

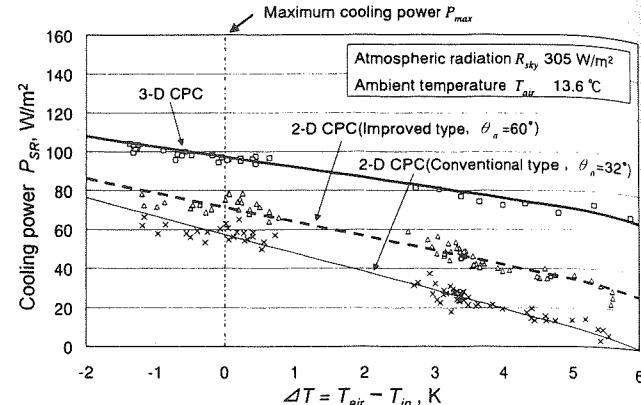


Fig.12 Experimental result of cooling power performance  
(Data: September 24, 2001)

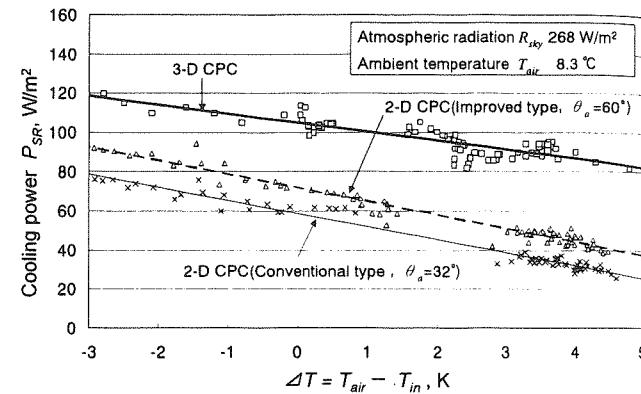


Fig.13 Experimental result of cooling power performance  
(Data: October 18, 2001)

なお、Rは式(3)において、 $\varepsilon_c=1$ 、 $T_c=T_{air}$ 、 $A_c/A_e=1$ 、 $q_{in}=R_{sky}$  および  $\Delta T=0$  とおいた量であり、次式で表される。

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

この結果からも3次元CPC型が他のタイプに比べて格段に良好な冷却性能を有することがわかる。

以上の結果に加え、様々な気象条件のもとで行った冷却性能試験より得られた最大冷却能力を、大気放射量をパラメータとしてまとめたものが図15である。

大気放射量の最も大きい夏期には、快晴時においても夜間の大気放射量は約400W/m<sup>2</sup>にものぼる。このとき、3次元 CPC型の最大冷却能力は約70W/m<sup>2</sup>となるが、2次元CPC型の最大冷却能力は約30W/m<sup>2</sup>であり、3次元CPC型は2次元 CPC型の2倍以上の冷却能力をもっていることがわかる。逆に大気放射量の少ない秋期または冬期においては、リフレクタの形状の違いによる最大冷却能力の差は小さくなるが、これは大気放射量が大きいときほどリフレクタにより大気放射の入射を削減する必要があり、大気放射量が減少するにつれて、リフレクタの効果が冷却能力に及ぼす影響が小さくなるためと考えられる。

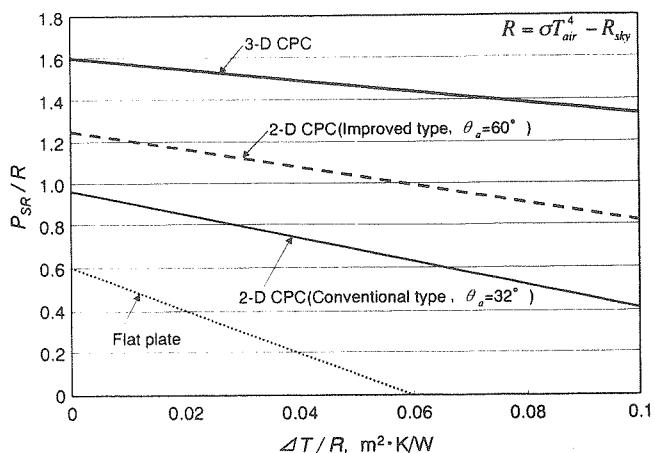


Fig. 14 Universal plot for experimental data 2-D, 3-D and flat plate type sky radiators

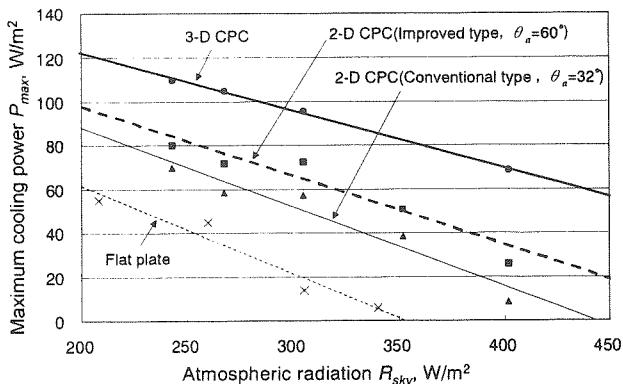


Fig. 15 Maximum cooling power  $P_{max}$  ( $P_{SR}$  at  $\Delta T=0$ ) comparison for various atmospheric radiations

## 5. 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、3次元CPC型スカイラジエータを提案し、試作器による検証実験を行い、以下の知見を得た。

- 理想的な光学系を仮定した放射収支シミュレーション結果に基づいて3次元CPC型スカイラジエータモジュールを試作し、冷却性能試験を行うことにより、前報<sup>(7)</sup>の2次元CPC型スカイラジエータ以上の冷却性能を実証した。
- 気温と熱媒体の温度が等しく、冷却が放射の形でのみ行われるときの冷却能力を最大冷却能力とする、この最大冷却能力は、3次元CPC型が最も大きく、とくに大気放射量の多い場合において、他のスカイラジエータに優れることを明らかにした。これは、3次元CPC型では、リフレクタにより大気放射の入射領域が天頂付近にのみ限定され、大気放射強度が大きい地表付近からの放射は反射され放熱部へ入射しないためである。
- 本研究では、CPC型リフレクタによる大気放射の遮断に焦点を置いたが、他方で、大気の窓領域においてのみ高い放射率を有する選択放射膜<sup>(1)(2)</sup>の導入による高性能化やポリエチレンフィルムに替わる対候性カバーの開

発が必要不可欠と思われる。また、実用化に際しては、十分な面積を確保することとシステムとしてのオペレーション技術や蓄冷技術との高度なマッチングが要求されるものと思われる。

## 記号表

$A_e$	: 開口部有効面積( $\text{m}^2$ )	$R$	$:= \sigma T_{air}^4 - R_{sky} (\text{W}/\text{m}^2)$
$A_c$	: 放熱部面積( $\text{m}^2$ )	$R_{sky}$	: 大気放射量( $\text{W}/\text{m}^2$ )
$A_f$	: 大気放射の入射比	$T_{air}$	: 外気温(K)
$A_f(\theta)$	: 大気放射の入射比	$T_c$	: 放熱部表面平均温度(K)
$C_r$	: 集光比	$T_{in}$	: ラジエータ入口温度(K)
$d_1$	: CPC開口部直径(m)	$\Delta T$	$:= T_{air} - T_{in}$ (K)
$d_2$	: CPC放熱部直径(m)	$U$	: 総合熱通過率( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ )
$H$	: フルCPCの高さ(m)	$\varepsilon_c$	: 放熱部の放射率
$H_{max}$	: CPCの高さ(m)	$\Theta$	: 天頂角(°)
$I_r$	: 大気放射の入射比	$\theta_a$	: 許容入射半角(°)
$P_{SR}$	: 冷却性能( $\text{W}/\text{m}^2$ )	$\theta_d$	: エッジレイ角(°)
$P_{max}$	: 最大冷却性能( $\text{W}/\text{m}^2$ )	$\tau(\theta)$	: カバー透過率
$q_{in}$	$:= Q_{in}/A_e$	$\sigma$	: Stefan-Boltzmann定数 $(5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2 \text{ K}^4)$
$Q_{sky}$	: 大気放射入射量( $\text{W}/\text{m}^2$ )	$\lambda$	: 波長(μm)
$Q_{sky}(\theta)$	: 大気放射入射量 ( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{sr}$ )	$R$	$:= \sigma T_{air}^4 - R_{sky} (\text{W}/\text{m}^2)$

## 参考文献

- C.C.Granqvist, "Radiative Heating and Cooling with Spectrally Selective surfaces", Applied Optics, vol.20 (1981), p.2606.
- 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.
- 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.
- R.Lazzarin, "On Natural Radiative Cooling", la thermotecnica, vol.18 (1979), p.345.
- 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.
- 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.
- 齋藤武雄,辰尾光一,山田昇, "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)", 太陽エネルギー, vol.2 (2002).
- A.Rabl, N.B.Goodman and R.Winston, "Practical Design Considerations for CPC Solar Collectors", Solar Energy, vol. 22 (1979), pp. 373-381.
- M.J.Carvalho, M.Collares-Pereira, J.M.Gordon and A.Rabl, "Truncation of CPC Collectors and its Effect on Energy Collections", Solar Energy, vol. 35, No.5 (1985), pp.393-399.
- ハンドブック編集委員会: 热物性ハンドブック, 養賢堂 (1990)
- 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.
- 田澤真人,金平,種村栄, "VO<sub>2</sub>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.