

3次元複合放物面集光(CPC)型ソーラーコレクタに関する研究

(第1報; 3次元CPC型ソーラーコレクタの性能試験および最適設計)

Study of Three-dimensional CPC (Compound Parabolic Concentrator) Solar Collector
(1st Report; Experiment and optimal analysis of three-dimensional CPC solar collector)

齋藤 武雄 *¹
Takeo S. SAITOH

山田 昇 *²
Noboru YAMADA

高橋 純 *³
Jun TAKAHASHI

中島 隆之 *⁴
Takashi NAKAJIMA

Abstract

In this paper, the authors propose an innovative stationary three-dimensional (3-D) compound parabolic concentrator (CPC) solar collector, which has excellent thermal efficiency for a high-temperature (100 °C - 250 °C) thermal effective application (i.e. solar thermal electric generation system). In the past studies, in order to improve the thermal efficiency of the solar collector in high temperature range, very high concentration and the tracking system has been used. However, the conventional high concentration solar collectors are not cost-effective and inappropriate for small scale thermal electric generation. The proposed 3D-CPC collector has a moderate concentration ratio and need not tracking the sun. First, the thermal performance of the experimental 3D-CPC collector is tested. Next, numerical simulations of the optical characteristics of the 3D-CPC collector were carried out with the ray-tracing method. Finally, the specification of the optimal 3D-CPC collector was defined.

キーワード: 太陽熱利用, 太陽集熱器, 3次元複合放物面集光型コレクタ, 性能試験, 光線追跡法, ソーラーランキンサイクルシステム

Key Words: Solar thermal application, Solar collector, 3-D CPC collector, Performance test, Ray tracing, Solar Rankine cycle system

1. 緒言

近年, 化石燃料の大量消費により, 地球温暖化, 大気汚染, 酸性雨などの被害が世界各国で報告されている。また, 都市スケールでは, 自動車や冷・暖房などによる集中的なエネルギー消費に伴う都市温暖化(ヒートアイランド)が顕在化しており⁽¹⁾, 太陽エネルギー, 放射冷却, 風力や水力の利用などクリーンな自然エネルギーの有効利用が求められている。

このような背景のもと, 太陽エネルギーから電力を得る方法として, 太陽電池(Photovoltaic cell)が注目され, 数々の研究がなされており, 効率も年々向上している。太陽電池は太陽光利用の静的なシステムであり, メンテナンス等の維持費も低コストであるなどの多くのメリットがあり, 今後, 更なる普及が期待されている。

一方, 住宅などを含む民生用のエネルギー需要は, 暖房・給湯が60%を超えており, この大部分を太陽エネルギーで賄うことができれば環境負荷は大幅に削減できる。太陽エネルギーから熱を得るには, 太陽電池よりも太陽集熱器(ソーラーコレクタ)の方が格段に効率が良く, その研究・開発が行われてきた。また, ソーラーコレクタでは, 単に温水を製造するだけでなく, 得られた温水を高温熱源としたランキンサイクル(Solar Rankine Cycle System: SRCS)を稼働することによって発電も行うことができ, 総合効率を太陽電池よりも高められる。さらに, 水素やバイオガスの燃焼熱など他の再生可能エネルギーとの複合利用も容易である。

本研究では, SRCS向けのソーラーコレクタとして, 3次元複合放物面集光型(Three-dimensional Compound Parabolic Concentrator: 以下3D-CPC)ソーラーコレクタを提案する。従来の高温集熱用ソーラーコレクタは, 集光比を格段に大きくし, 太陽追尾を行うことで集熱効率を向上させてきた。しかしながら, 将来の家庭用などの分散型電源としての利用を考えると, 年間を通して太陽追尾を行う高集光比のソーラーコレクタでは, 設置面積の確保, 装置の複雑さやコストの面で普及

*¹ 東北大学大学院環境科学研究科 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 東北大学大学院環境科学研究科 助手

*³ JFE スチール(株) (〒100-0011 東京都千代田区内幸町2-2-3)

*⁴ 東北大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻
(原稿受付: 2003年6月12日)

が困難と考えられる。そこで本研究では、高温集熱のために集光比を適度に高めた無追尾のソーラーコレクタを提案することを目標としている。また、本研究において提案するソーラーコレクタは寒冷地においても従来のソーラーコレクタより高効率期待される。

2. 3次元CPC型ソーラーコレクタの提案

2.1 従来のCPC型ソーラーコレクタの研究

従来の平板型ソーラーコレクタでは集熱効率が悪化する100℃以上の集熱温度領域において、無追尾でありながら高効率を狙えるコレクタとして、複合放物面集光型(Compound Parabolic Concentrator, 以下CPC)形状のリフレクタを有するソーラーコレクタが1974年にWinstonら⁽²⁾により提案され、その後、Rabl *et al.*⁽³⁾⁽⁴⁾やCarvalho *et al.*⁽⁵⁾によって主に2次元CPC(以下、2D-CPC)ソーラーコレクタの解析が行われた。日本では中原ら⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾が2D-CPCコレクタを実用化し、蒸気発生システムを設け、工場の乾燥炉の運転に利用している。Suzuki and Kobayashi⁽⁹⁾は、2D-CPCの最適な許容入射半角を解析により明らかにしている。さらに、齋藤ら⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾⁽¹²⁾も2D-CPCソーラーコレクタを製作し、その有効性について報告している。

2.2 3次元CPC型ソーラーコレクタ⁽¹⁷⁾

2D-CPCソーラーコレクタは、通常固定式であるため、集光比は1.5~2程度の弱集光で、集熱管を真空管式としたり、コレクタ内部をクリプトンガスなどの低熱伝導性ガスで満たしたりするなどの工夫により、集熱温度がおおよそ100~200℃の範囲においてに平板型より集熱効率が高いという特長を有するが、SRCS向けのソーラーコレクタとしては、150~250℃の蒸気製造が必要であり、この温度範囲における高効率化が不可欠となる。

そこで本研究では、2D-CPCよりも集光比を高められ、なおかつ受光可能入射角をある程度の大きさに保持できる3次元CPC型(3D-CPC)ソーラーコレクタを提案する。

本研究では、まず、3D-CPCソーラーコレクタの実現可能性を検証するため、小型モジュールを試作し、実際の日射条件において集熱性能試験を行った結果について報告する。

2.3 試作3D-CPCソーラーコレクタ

図1に試作した3D-CPCソーラーコレクタモジュールの概略図を示す。3D-CPCソーラーコレクタはリフレクタキャビティ底面の円形の集熱板と熱媒管(銅管)、3D-CPCを有するリフレクタ、カバー、およびケースからなる。リフレクタは図2に示すようなCup型を採用し、許容入射半角(Half acceptance angle) θ_a を32°とした。また、集光比が大幅に減少しない程度にランケーション(切頭)を行い(図2におけるランケーション率

$H/H_{max}=0.62$)、開口部の直径 d_2 を27mm、高さ H を21.5mmとする。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。このリフレクタを図3のように縦に13個、横に22~23個、計293個を最密(Staggered array)になるよう設置することによりモジュールを形成した。開口部有効面積 S_e はモジュールに外接する長方形の面積であり、0.205m²となった。これは、リフレクタ間の間隙を含めた値である。ソーラーコレクタ本体および断熱材はアルミニウム製のケースに入れ、カバーにはフロート板ガラス(透過率0.92)、もしくはクリプトンガス封入ペアガラス(透過率0.80)を使用し、ペアガラス使用時には、コレクタ内部にもクリプトンガスを封入した。クリプトンガスの熱伝導率は空気の約1/3である。また、集熱板には太陽光吸収率 α が0.95、放射率 ε_b が0.3の選択吸収塗装を施した。表1に各構成部材の熱物性値を、表2に3D-CPCソーラーコレクタの仕様を示す。

2.4 性能試験方法

図4に本モジュールの概観を示す。試験は本学の機械系2号館屋上にて行った。熱媒体には水を用い、ポンプによりソーラーコレクタ内を循環させている。この際、熱媒体の流量は0.4 liter/minとし、必要に応じてヒーターにより熱媒体の流入温度を変化させた。なお、実験は安定した日射条件で行った。計測系は熱電対によりソーラーコレクタの入口水温 T_{in} および出口水温 T_{out} を測定し、全天日射計により測定したコレクタ面全天日射量 I と同時にデータロガーを通して10秒毎にデータを収集した。得られた入口、出口水温の差、流量から集熱量を求め、これを I と有効面積 S_e の積で除することによってソーラーコレクタの集熱効率 η_c を算出した。

2.5 試験結果

図5に集熱性能試験の結果および試験時のコレクタ面全天日射量 I 、外気温 T_a および風速 v を示す。 I が一定の条件では、横軸のパラメータ $(T_m - T_a)/I$ が大きいほど高温集熱となる。 T_m は平均集熱温度であり、 $T_m = (T_{in} + T_{out})/2$ で求められる。150~250℃の T_m に対して、 $T_a = 15^\circ\text{C}$ 、 $I = 850\text{W/m}^2$ とすると $(T_m - T_a)/I$ はおおよそ0.16~0.22の範囲となる。

$T_m = T_a$ の場合、すなわちグラフの切片はソーラーコレクタの光学性能を示し、カバーとしてクリプトンガス封入複層ガラスを使用した場合、単板ガラスを使用した場合に較べて、約8%の光学性能の低下が見られた。しかし、 $(T_m - T_a)/I$ が大きい領域では、ガラスを通過する熱損失および風による対流熱損失を大幅に低減できるため、単板ガラスを用いた場合よりも格段に η_c が大きくなっており、 $(T_m - T_a)/I = 0.2$ 付近において $\eta_c = 25\%$ が見込まれる。本試作モジュールでは、集熱板に赤外放射率0.3という高温集熱向けとしては比較的高い放射率の選択吸収塗装をしており、このため $(T_m - T_a)/I$ が大きい領域での放射熱損失が大きく、実用化に際しては、0.1以

下の選択吸収膜処理を行うことが望ましい。さらに、試作モジュールでは図3に示すとおり、日射を受ける有効面積に対し光学的欠損(Dead space)の割合が約18%あり、理想的な場合よりも集熱効率が落ちていると思われる。図5にはこれらの問題点を改善したときの予測性能もプロットした。改善により $(T_m - T_a)/I = 0.2$ 付近において約50%の η_c が見込まれる。

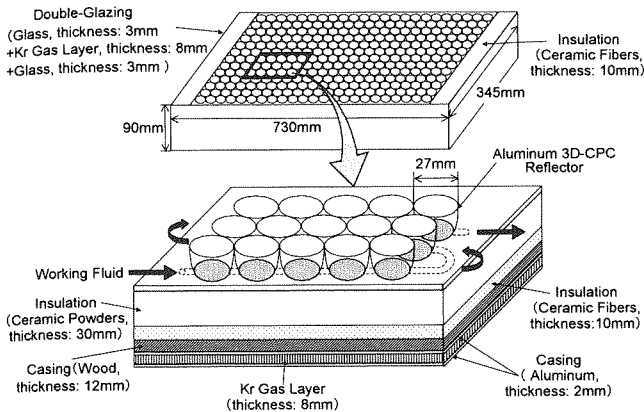


Fig.1 Outline of the tentative 3D-CPC solar collector module

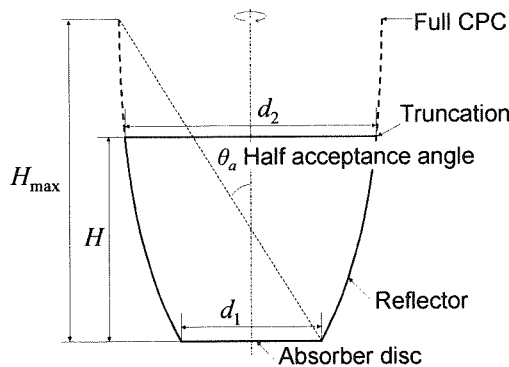


Fig.2 Cross section of the 3D-CPC reflector

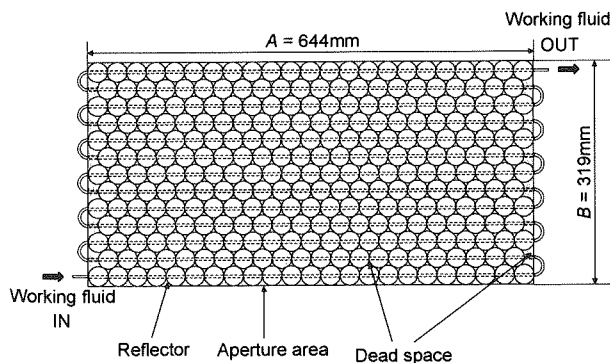


Fig.3 Configuration of reflectors and absorber pipes ($A \times B = 0.205 \text{ m}^2$)

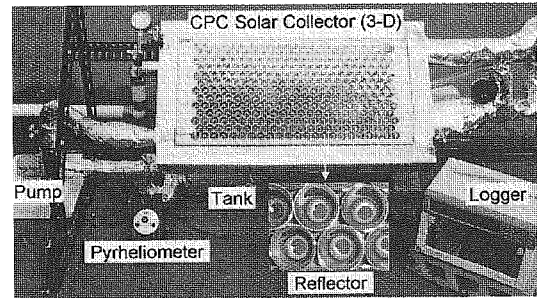


Fig.4 View of the tentative 3D-CPC solar collector module

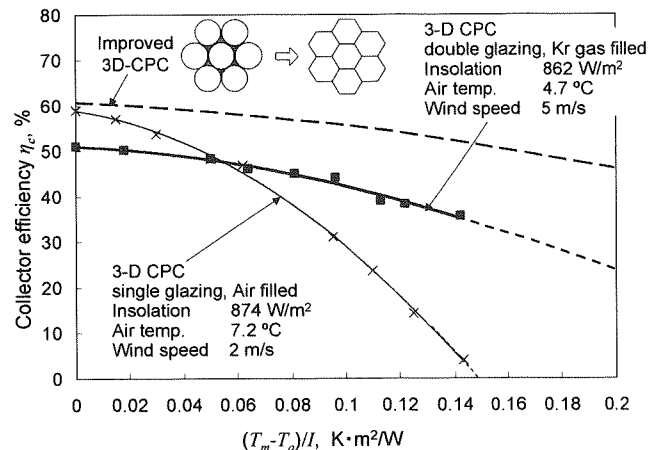


Fig.5 Result of performance test of 3D-CPC collector and expected data of improved 3D-CPC collector

Table 1 Thermal properties of compositions of the tentative 3-D CPC collector⁽¹³⁾

	Density [kg/m ³]	Specific heat kJ/(kg·K)	Thermal conductivity W/(m·K)
Working fluid (water)	999.8	4.213	0.562
Glass wool	16	0.8374	0.0493
Ceramic powders	200	0.9	0.022
Ceramic fibers	160	1.05	0.034
Krypton gas	2.554	0.2486	0.0124
Air	0.881	1.015	0.0331

*Reference Temp.: 100°C

Table 2 Specification of the tentative 3D-CPC solar collector

Effective aperture area, S_c	m ²	0.205
Tilt angle	°	45
Azimuth angle	°	0 (due south)
Flow rate	liter/min	0.4
Half acceptance angle, θ_a	°	32
Truncation ratio, H/H_{max}	—	0.62
Absorber disc diameter, d_1	mm	15
CPC aperture diameter, d_2	mm	27
Concentration ratio, C	—	3.2
Reflectance of reflector	—	0.88
Transmittance of cover	—	—
Single glazing	—	0.92
Double glazing	—	0.80
Absorption of absorber, α	—	0.95
Emissivity of absorber, ϵ_b	—	0.3

3. レイトレーシングによる光学解析および年間集熱シミュレーション

3.1 解析手法およびシミュレーション手法

前節で試作した3D-CPCリフレクタの許容入射半角 θ_a およびトランケーション率 H/H_{max} は2D-CPCソーラーコレクタで経験的に用いられる値であり、3D-CPCとしての最適値ではない。また、前節の性能試験は直達日射が集熱板に入射する条件に限定されたものであったが、3D-CPCソーラーコレクタにおける最も重要な問題は、集光比の増大による入射角度の制限の影響であると思われる。そこで、本節では、3D-CPCリフレクタに対してレイトレーシング(光線追跡)ならびに年間集熱シミュレーションを行って、 θ_a および H/H_{max} の最適値を明らかにする。リフレクタでの反射の取扱いに関しては、リフレクタへ垂直に入射する際(入射角 0°)の反射率を0.88とし、指向反射率はフレネル則に従うものとした⁽¹⁴⁾。その際、指向反射率は太陽光の波長範囲における平均値とした。光源はリフレクタ開口部に乱数を用いてランダムに決定し、光線数は15000本とした。

ある日時におけるコレクタの集熱効率 η_c は、集熱板での熱収支より次式で求められる。

$$\eta_c = \frac{\alpha(\tau_B \rho_B^{<m>} I_B + \tau_D \rho_D^{<m>} I_D)}{I_B + I_D} - \frac{\varepsilon_b \sigma T_b^4 + K(T_b - T_a)}{(I_B + I_D)C} \quad (1)$$

ここで、 α は集熱板の太陽光吸収率、 τ_B および τ_D はそれぞれ直達日射および散乱日射に対するカバー透過率、 $\rho_B^{<m>}$ および $\rho_D^{<m>}$ は、それぞれ直達日射および散乱日射に対するリフレクタの等価反射率であり、これをリフレクタ開口部から入射した太陽エネルギーのうち集熱板に入射するエネルギーの割合と定義し、レイトレーシングにより求める。 I_B および I_D はそれぞれコレクタ面直達日射量および散乱日射量である。 ε_b は集熱板の放射率、 σ はStefan-Boltzmann定数、 T_b および T_a はそれぞれ集熱板温度および外気温、 K は対流および熱伝導によるコレクタの熱通過率、 C は集光比である。 K は次式により求めた。

$$K = \frac{2}{1/h + d/\lambda} \quad (2)$$

ここで、 h はカバーおよびケーシング表面における対流熱伝達率、 d は集熱板からカバーおよびケーシングまでの厚さ、 λ はクリプトンガスの熱伝導率であり、一次元熱伝導による集熱板両面からの損失を考慮した。カバーおよびケーシング自体の厚さの影響およびコレクタ内部での自然対流の影響は無視した。また、 h は次式により求めた⁽¹⁵⁾。

$$h = 5.7 + 3.8v \quad (3)$$

ここで v は風速である。なお、日射量、気温、風速については、拡張アメダス気象データ⁽¹⁶⁾の特別標準データを用いた。なお、仙台における年間平均風速2.1mの条件での K 値は $1.2\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ となる。集熱板温度 T_b は、平均集熱温度 T_m に等しいものとし、高温集熱を考慮して 200°C と固定とした。すなわち本解析では、集熱温度を一定とした場合の3D-CPCソーラーコレクタの集熱効率 η_c を毎時算出し、 η_c が正の場合における集熱量 $\eta_c(I_B + I_D)$ の年間積算値を $(I_B + I_D)$ の年間積算値で除した年間集熱効率 $\eta_{c,y}$ によって性能を評価する。表3に本解析における条件および各パラメータの設定値を示す。コレクタ設置地点は仙台市(北緯38度、東経140度)を想定し、設置角度は年間を通して午前10時から午後2時のコレクタ面の法線に対する太陽光の入射角が約 35° 以内におさまるよう 30° に設定した。また、方位角は 0° (真南)とした。

Table 3 Conditions of the present ray tracing analysis

Simulation period	days	365
Place	—	Sendai, Japan (Lat. 38° , Long. 140°)
Tilt angle	$^\circ$	30
Azimuth angle	$^\circ$	0 (due South)
Operating temperature, T_m	$^\circ\text{C}$	200
Absorption of absorber surface, α	—	0.95
Emissivity of absorber surface, ε_b	—	0.1
Reflectance of CPC reflector,	—	0.88 (vertical direction)
Transmittance of cover, τ_B, τ_D	—	0.92
Thickness of Kr gas layer, d	m	0.025
Thermal conductivity of Kr, λ	W/m·K	14.9×10^{-3}

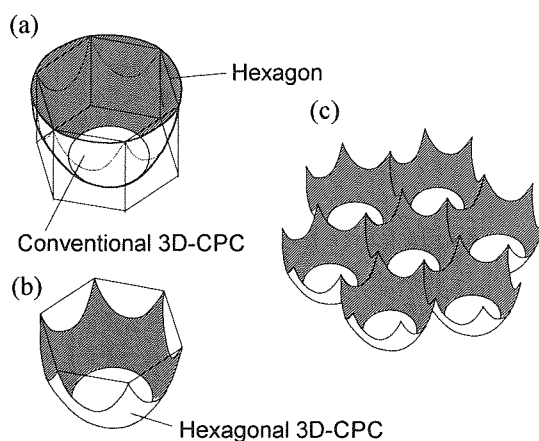


Fig.6 Newly proposed hexagonal 3D-CPC reflector⁽¹⁸⁾

3.2 内接六角形型CPCリフレクタの提案

前述のように、従来の3D-CPCリフレクタをモジュール化する際に、いかに細密に並べても開口部が円形状であるため、受光面積に約2割の集光に寄与しない空隙、すなわち光学の欠損が生じる。これを改善するため、図6に示すような開口部が内接六角形状の3D-CPCリフレクタ⁽¹⁸⁾を考案した。内接

六角形型は、図6(a)および(b)に示すように、従来の3D-CPCリフレクタを開口部の円に内接する六角柱で切り抜いたような構造である。これを図6(c)のように細密に並べることで受光面積の欠損を無くしたモジュールとなる。

3.3 シミュレーション結果

図7および図8には、従来型3D-CPCおよび内接六角形型3D-CPCにおける入射角 θ と等価反射率 $\rho_B^{<m>}$ の関係を示す。なお、 θ_a は 30° で固定し、 H/H_{max} を0.1刻みで変化させている。いずれの結果もリフレクタ反射率による減衰があるものの、 θ_a より小さい入射角の光線は集熱板に入射し、 θ_a より大きい入射角の光線はリフレクタにより外部へ反射されるCPCリフレクタの基本特性が現れている。この傾向は従来型3D-CPCにおける $H/H_{max} = 1.0$ (full CPC)の場合が最も顕著である。また、 H/H_{max} が小さくなるほど、より大きな入射角の入射を集熱板に受けるようになるが、このとき集光比 C は低下し、平板型に近づく。図7と図8を比較すると、内接六角形型は従来型に較べて、最大許容入射角が大きくなる傾向がある。また、 H/H_{max} が0.5以上では、 θ_a より小さい領域での減衰が増える傾向がある。

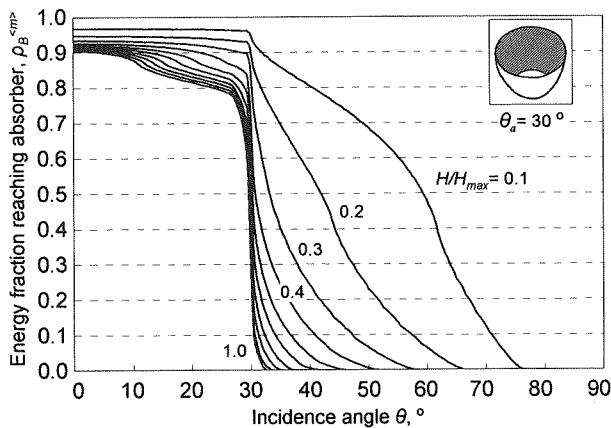


Fig.7 Energy fraction reaching absorber for various H/H_{max} ($\theta_a=30^\circ$, Conventional 3D-CPC)

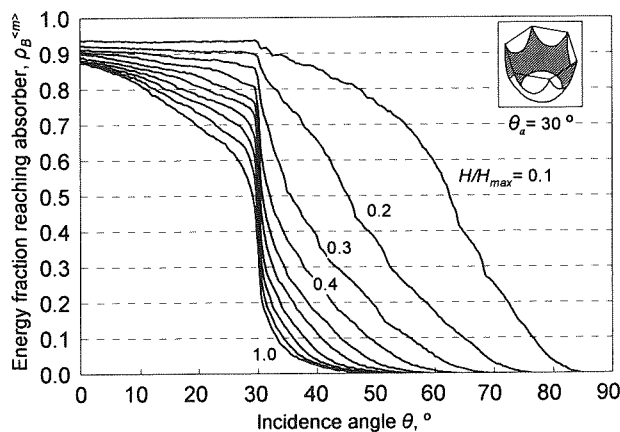


Fig.8 Energy fraction reaching absorber for various H/H_{max} ($\theta_a=30^\circ$, Hexagonal 3D-CPC)

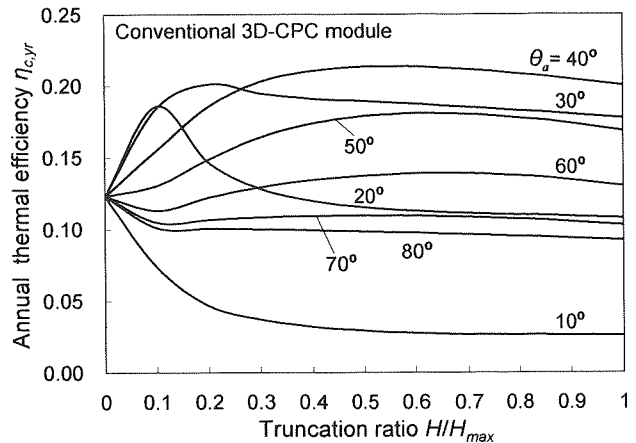


Fig.9 Annual thermal efficiency for various θ_a and H/H_{max} (Conventional 3D-CPC)

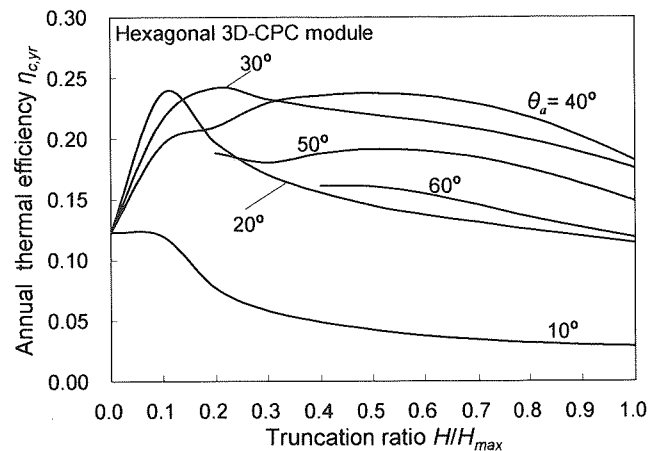


Fig.10 Annual thermal efficiency for various θ_a and H/H_{max} (Hexagonal 3D-CPC)

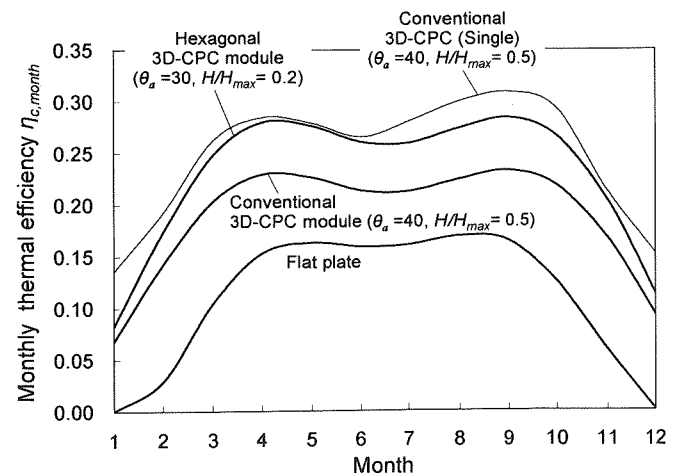


Fig.11 Monthly thermal efficiency of the conventional and hexagonal 3D-CPC solar collector

図9および図10には、従来型3D-CPCおよび内接六角形型3D-CPCモジュールにおいて θ_a と H/H_{max} をパラメータにしたときの年間集熱効率 $\eta_{c, yr}$ のシミュレーション結果を示す。ただし、図9では従来型3D-CPCをモジュール化した際に生じる受光面積欠損を18%とし、これを減じた値をプロットした。また、図10において、 θ_a が 50° ならびに 60° の結果が途中で途切れており、さらに 70° と 80° の結果が示されていない。

これらの領域では集光比が小さいため、開口部で決定される内接六角形が集熱板の円板の一部と交差し、形状が複雑になるため本解析では除外した。いずれの場合においても、 θ_a が 90° 、 H/H_{max} が0に近づくにつれ平板型の値に収斂するが、従来型3D-CPCにおいては、 $\theta_a = 40^\circ$ 、 $H/H_{max} = 0.5$ のとき最も効率がよく、 $\eta_{c,yr} = 0.21$ となった。一方、内接六角形型では、 $\theta_a = 30^\circ$ 、 $H/H_{max} = 0.2$ のとき最も効率がよく、 $\eta_{c,yr} = 0.24$ となり、従来型よりも15%程効率が良いという結果が得られた。

図11には、図9および図10において最も効率の良い θ_a および H/H_{max} における従来型3D-CPC、内接六角形型3D-CPCモジュールおよび平板型の月別集熱効率 $\eta_{c,month}$ を示す。比較のため、従来型3D-CPC単体での値もプロットした。これより、従来型3D-CPC単体での $\eta_{c,month}$ は内接六角形型よりも若干良いことがわかる。しかしながら、モジュール化の際の受光面積欠損を考慮することによって、結果的には内接六角形型の方が良くなる。この内接六角形型3D-CPCおよび本シミュレーション条件を採用することにより、図5で示したように集熱効率が向上する。なお、図12には本シミュレーションによって得られた従来型3D-CPCおよび内接六角形型3D-CPCの最適形状を示した。

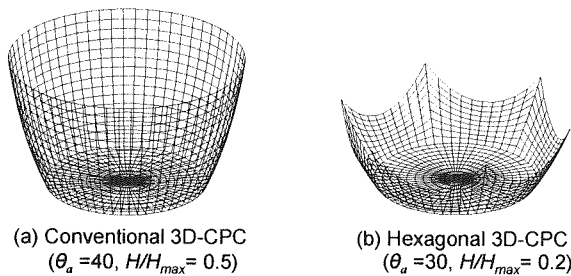


Fig.12 Optimal design of the conventional and hexagonal 3D-CPC reflector

4. 結 言

本報では、ソーラーランキンサイクルシステムの熱源に適する、高温領域において高効率なソーラーコレクタとして、定置式の3次元CPC型ソーラーコレクタを提案し、試作器による性能試験ならびにレイトレーシングによる光学解析に基づく年間集熱シミュレーションを行い、以下の知見を得た。

- 1) 3次元CPC型ソーラーコレクタを実際に試作し、集熱性能試験を行うことにより基本性能を示した。また、受光面積欠損などの問題点を明らかにした。
- 2) 受光面積欠損を補填する方策として、新たに内接六角形型3次元CPC型ソーラーコレクタを提案した。
- 3) 3次元CPC型ソーラーコレクタモジュールにおける年間集熱シミュレーション結果から、 200°C の高温集熱において3次元CPC型が有効であること、ならびに従来型と内接六角形型の許容入射半角 θ_a 、トランケーション率 H/H_{max} の最適値を明らかにし、とくに内接六角形型が優れていることを示した。

記号表

A, B	: 3D-CPCモジュール寸法, m
C	: 集光比
d	: 集熱板からカバーまでの厚さ, m
d_i	: 集熱板直径, m
d_2	: リフレクタ開口部直径, m
h	: カバー表面での対流熱伝達率, $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$
H	: リフレクタ高さ, m
H_{max}	: full CPC形状における H , m
H/H_{max}	: トランケーション率
I	: コレクタ面全天日射量, W/m^2
I_B	: コレクタ面直達日射量, W/m^2
I_D	: コレクタ面散乱日射量, W/m^2
K	: コレクタ熱通過率, $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$
S_c	: コレクタ開口部有効面積, m^2
T	: 温度, K or $^\circ\text{C}$
T_a	: 外気温, $^\circ\text{C}$
T_b	: 集熱板温度, $^\circ\text{C}$
T_{in}	: コレクタ入口温度, $^\circ\text{C}$
T_m	: 平均集熱温度 = $(T_{in} + T_{out})/2$, $^\circ\text{C}$
T_{out}	: コレクタ出口温度, $^\circ\text{C}$
v	: 風速, m/s
α	: 集熱板の太陽光吸収率
ϵ_b	: 集熱板の放射率
η_c	: コレクタ集熱効率
$\eta_{c,yr}$	: コレクタ年間集熱効率
$\eta_{c,month}$	: コレクタ月別集熱効率
θ	: 入射角, $^\circ$
θ_a	: 許容入射半角, $^\circ$
λ	: Krガスの熱伝導率, $\text{W/m}\cdot\text{K}$
$\rho_B^{<m>}$	: 直達日射に対する等価反射率
$\rho_D^{<m>}$	: 散乱日射に対する等価反射率
τ_B	: 直達日射に対するカバー透過率
τ_D	: 散乱日射に対するカバー透過率
σ	: Stefan-Boltzmann定数 ($5.67032 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\cdot\text{K}^4$)

参考文献

- (1) 齋藤武雄, “ヒートアイランド”, 講談社 (1997).
- (2) Winston, R., *Solar Energy*, Vol.16 (1974), pp.89-95.
- (3) Rabl, A., Goodman, N.B. and Winston, R., *Solar Energy*, Vol.22 (1979), pp.373-381.
- (4) Rabl, A., O’Gallagher, J. and Winston, R., *Solar Energy*, Vol.25 (1980), pp.335-351.
- (5) Carvalho, M. J., Collares-Pereira, M., Gordon, J. M. and Rabl, A., *Solar Energy*, Vol.35, No.5 (1985), pp.393-399.
- (6) 中原信生, 日本太陽エネルギー学会誌, Vol.10, No.4 (1984), pp.6-9.
- (7) 中原信生, 森欣也, 青木良英, 日本太陽エネルギー学会第8回研究発表会講演論文集(1982), pp.117-120.
- (8) 中原信生, 森欣也, 青木良英, 日本太陽エネルギー学会第8回研究発表会講演論文集(1982), pp.121-124.
- (9) Suzuki, A. and Kobayashi, S., *Solar Energy*, Vol.54, No.5 (1995), pp.327-331.
- (10) 齋藤武雄, 奥平英人, 星朗, 日本機械学会論文集B編, 69巻, 680号(2003), pp.142-148.
- (11) 星朗, 齋藤武雄, 日本太陽エネルギー学会誌, Vol.28, No.6 (2002), pp.46-53.
- (12) 齋藤武雄, 応用物理, Vol.72, No.7 (2003), pp.891-895.
- (13) 熱物性ハンドブック編集委員会: 熱物性ハンドブック, 養賢堂(1990).
- (14) 圓山重直, 日本機械学会論文集B編, 57巻, 535号(1991), pp.306-312.
- (15) McAdams, W.H., *Heat Transmission* (3rd ed.), McGraw-Hill (1954).
- (16) 日本建築学会, “拡張AMeDAS気象データ”, 丸善(2003).
- (17) Saitoh, T. S., Pat. Pending (No.21127).
- (18) Saitoh, T. S., Pat. Pending (No.21728).