

非対称集光器の結合形態を利用した 集光・集熱性能の向上*

Improvement of the Collector Performance Using the Combined Configuration of Asymmetric Concentrators

藤原正純**
Masanori FUJIWARA

Abstract

Ideal asymmetric concentrators exhibit a superior concentration performance for the half region of the acceptance angle compared with ideal symmetric concentrators. It is possible to keep the superior performance for the whole acceptance region by adopting the combined configuration of asymmetric concentrators. The introduction of the two-stage cascade heat collection induces a considerable improvement of the heat collection performance especially in the high-temperature region. As a most suitable configuration, the Combination of the Extended CPC (COMBEC) is presented.

Key Words :Solar collector, Asymmetric concentrator, Combined configuration, Cascade heat collection

1. はじめに

2次元CPC (Compound Parabolic Concentrator)

(1)は理想集光器の1種であり、一定範囲内の入射角を持つ入射光は全て吸収面に到達し、それ以外の入射光は再び外へ放出される。集光可能な入射角の領域を許容角といい、その1/2を許容半角 θ_{\max} と定義する。CPCの最も基本的な形式の断面形状を図1に示す。鏡面の形状は、吸収面の端点を焦点とし、軸が吸収面の法線より± θ_{\max} 傾いた放物面で与えられる。放物線の性質より、放物線の軸に平行な入射光は全て焦点に集光される。従って、許容角内の入射光は全て1回反射の後、吸収面に到達する。幾何学的集光比 C_g は次式で与えられる。

$$C_g = 1 / \sin \theta_{\max} \quad (1)$$

ここで、幾何学的集光比は開口部と吸収面の面積比で定義される。(1)式の集光比が理想的な値であることは、幾何光学あるいは熱力学第二法則により証明される⁽¹⁾⁽²⁾。

一方、CPCのように対称な形状を持つ集光器に対して、非対称集光器と呼ばれる集光器が存在し、対称型よりも大きな集光比を実現し得ることが知られている。例えば、図2に示すSPC (Semi-Parabolic

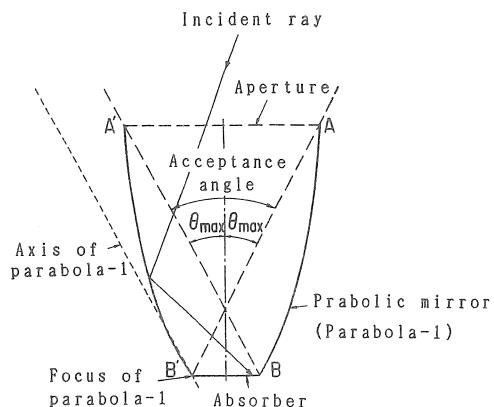


図1 基本型CPCの断面形状

Concentrator)⁽³⁾は、その典型的な例である。図中のP点は放物線の焦点であり、CPCと同様な原理により許容角内の入射光は全て吸収面に到達する。なお、本論文では集光器は全て2次元集光器を取り扱っている。このため、集光器の形状は全て断面図で表し、図中の光線は断面への射影を表している。この場合の幾何学的集光比は次式で与えられる。

$$C_g = \overline{AP} / \overline{BP} = 1 / \sin^2 \theta_{\max} \quad (2)$$

* 原稿受付 平成3年6月18日

** 会員 電子技術総合研究所エネルギー基礎部

Energy Fundamentals Division, Electrotechnical Laboratory

(2)式は必ず(1)式よりも高い値を与える。しかるに、(1)(2)式は幾何学的集光比であり、入射光が開口面となす角度の影響(コサイン効果)は入っていない。CPCの場合には、許容角が開口面法線に対して対称に配置しているのに対し、SPCの場合には開口面に斜めに入射する光の割合が大きい。従って、両者を比較するためには、入射光のコサイン効果も考慮に入れた光学的集光比について考える必要がある。光学的集光比は、開口面と受光面における入射光の入力密度の比で定義される。

光学的集光比は当然、入射光の入射角に依存した値となる。CPCの場合には、垂直入射の場合に光学的集光比が最大となり、その値は(1)式の幾何学的集光比と一致する。SPCの場合には、許容角の中心の入射角で入射する光は、(1)式の CPCと同じ値の光学的集光比になる。一方、図2中のNで示した許容角の限界角度での入射光は、光学的集光比として $2/\tan\theta_{\max}$ を与える。この値は、 $\theta_{\max} \leq 45^\circ$ の場合に SPC の光学的集光比の最大値を与える。 $\theta_{\max} \geq 45^\circ$ の場合には、垂直入射光が許容角に含まれることになる。この場合は垂直入射に対して光学的集光比が最大となり、その値は(2)式の幾何学的集光比と一致する。これらの最大値は何れも、(1)式で与えられる CPC の最大値を上回っている。ただし、開口面とのなす角の小さい入射光の光学的集光比は、CPCよりも小さくなる。従って、SPCは一定の入射角領域において、CPCを凌駕する集光性能を発揮することが可能である。なお、SPCも熱力学第二法則により規定される最大の集光性能を満たしており、やはり理想集光器の一種である。

このように、非対称集光器は入射角により集光比が大幅に異なるため、負荷が季節的な変動を伴う場合や、集光器の設置角度を季節的に調節する場合に適している(1)(3)(4)。さらに、最小の使用材料で最大のエネルギー収集を行うという観点からの最適化も行われている(5)(6)。

本論文では、非対称集光器の高い集光特性を、集光性能の向上に有効に活用する方策について考察を行う。具体的には、2つの非対称集光器を線対称に配置することにより、両者の集光量に格差を発生させ、集光量の少ない方を予備加熱に、他方を主加熱に用いるという方式である。

この方式の、最も簡単な例は、PateraとRobertson(7)によって提案された図3のような矩形型トラフ集光器である。この構成では、開口面に対して斜めに入射した光は、2つの吸収面のどちらか一方に重点的に吸収される。そこで、吸収量の少ない方の吸収面から多

い方の吸収面へと直列に集熱を行えば、両者に均等に入射光が入力する場合よりも効率よく集熱することができる。その有効性の一般的な証明は、Patera(8)により行われている。その後、OshidaとSuzuki(9)により、フレネルレンズと鏡面による集光系に対して2段階集熱を適用した構成が、OCC(Optical Cascade Collector)として提示され、解析的、実験的な研究が成されている。

本論文では、このようなOCCが有効に機能する構成を、非対称集光器の結合形態として捉え直した所に特徴がある。これにより種々の構成を統一的に認識することが可能である。また、最も実用に適した形態について、その集光・集熱性能の解析を行っている。その結果、この構成方法は集熱性能の向上に非常に有効な手段であることが示された。

2. くさび型吸収面を有する CPC

CPCには吸収面の形状に応じて数種類のバリエーションがある。図4はくさび型の吸収面の例である。このタイプは、図2に示したSPCを対称に結合させたものもある。この際、2つのSPCは互いに許容

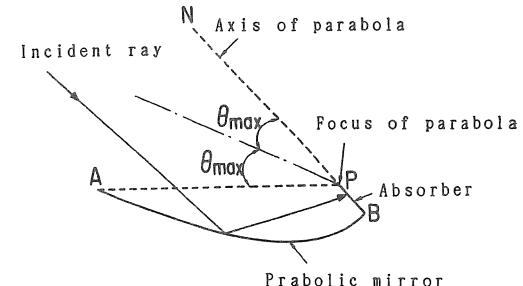


図2 SPCの断面形状⁽³⁾

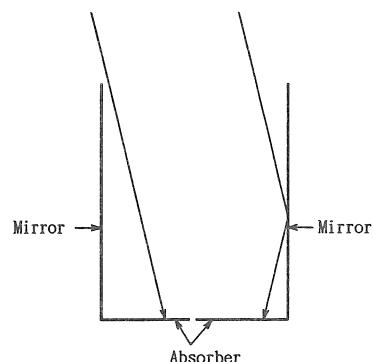


図3 矩形トラフ型集光器の断面形状⁽⁷⁾

角が重なるように配置されている。このように非対称集光器を結合させる配置が、本論文で考察を行う結合形態の最も単純な例である。

図4の構成では、入射角により光学的集光比は左右2つのS P Cモジュールで異なっている。1つのモジュールは常に(1)式の集光比を越える集光をし、他方は必ず(1)式を下回っている。この構成はC P Cの1種であるから、両者の平均の集光比は図1の基本型のC P Cの集光比と一致する。また、開口面に対する法線面内に入射光が存在する場合には、例外的に2つのモジュールの集光比は基本型のそれと一致する。

ここで、2つのモジュールの吸収面をフィン付きのパイプで構成し、両者のパイプの一端をgo-return方式で直結する。そして、低集光モジュールから高集光モジュールへと熱媒体を流すという方式を採用する。これにより、低集光モジュールで予備加熱を行った後、高集光モジュールでより効果的に熱媒体の加熱を行うことができる。このように、加熱領域の後半部において集中的に光を集光させることは、平均的に光を照射する場合よりも高い温度の熱を比較的容易に得ることを可能にする。太陽の位置が変化し入射方向が許容角の中心を横切ったときには、熱媒体の流れ方向を反転させることが必要であるが、これはバルブ操作により比較的簡単に実現することができる。

しかしながら、上記の2段階集熱を図4のくさび型吸収面で実施するには2点ほど問題がある。第1点は2つの吸収面が接触しているため、両者の間の熱伝達により2段階集熱の効果がかなり低下するということである。第2点は、高温での集熱を有効にするための真空断熱を施す場合に、2つの吸収面を分離することが困難であるという点である。結局、2つの吸収面は熱的に分離されていることが望ましいが、実際的には困難であるといえる。

この問題は、図5に示すように複数のS P CをV字型に配列すれば、中央部の吸収面以外は熱的に分離されることになり、かなり緩和する。同様な構成は、Millsにより円筒型吸収面（吸収管）を用いた集光器で提案されている⁽⁴⁾。しかしながら、このような構成法は、1モジュールを集熱に適した大きさにすれば全体のフレームが過度に大きくなるという欠点を有する。

そこで本論文では、集光器としては最も完成度の高いC P Cを基本構造として採用する方法について考察を行う。この場合、基本となる非対称集光器として、C P Cの鏡面の一端を直線的に拡張した形態が考えられる。ここでは、この集光器をE C P C（Extended CPC）と呼ぶことにする。

3. E C P C (Extended CPC)

E C P Cは、図6に示すように、C P Cの鏡面の一端を開口面に垂直方向に延長したものである。同図で

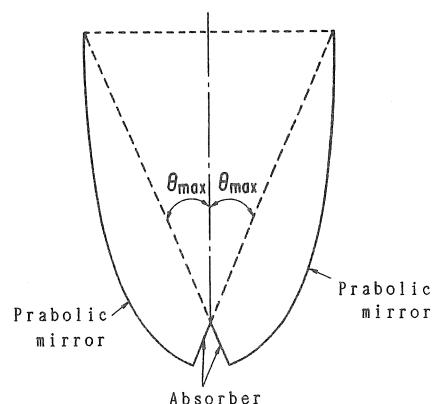


図4 くさび型吸収面を有するC P Cの断面形状

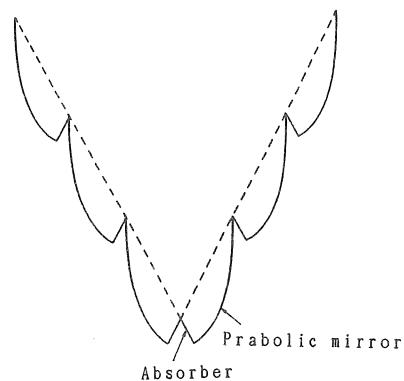


図5 S P C のV字型配列

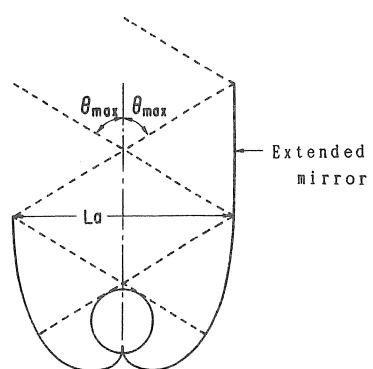


図6 E C P C の断面形状

は、CPCとして最も普及の進んでいる円筒型吸収面を用いるタイプを基にしている。CPCの鏡面は開口面に対して垂直に交わるので、ECPCの拡張鏡面の接合点での曲率は滑らかに接続する。拡張鏡面の長さはCPCの開口面の幅を L_a とすると、 $L_a/\tan\theta_{max}$ である。この構成では、吸収面と許容角の関係は変わらないが、開口面が拡張され、その法線に対して許容角は対称ではない。従って、ECPCは非対称集光器の

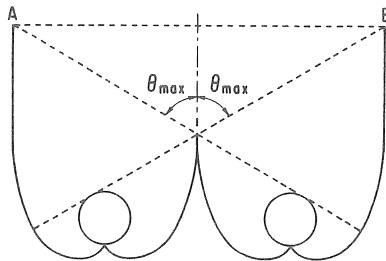
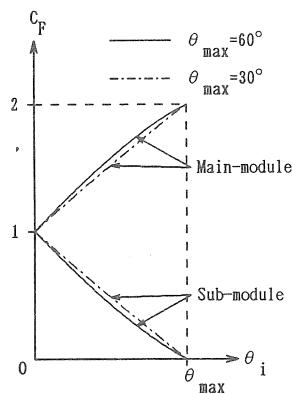
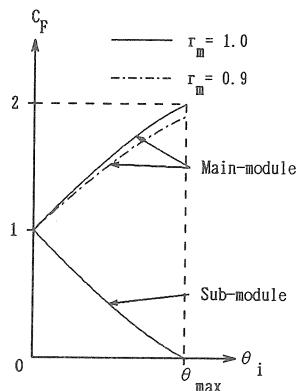


図7 COMBECの断面形状

図8 COMBECの集光係数 C_F と入射角 θ_i の関係図9 C_F に関する反射損失の影響 ($\theta_{max} = 60^\circ$)

一種である。

ECPCは、非対称集光器としては理想集光器に該当し、幾何学的集光比や光学的集光比と許容角の関係は、先に述べたSPCの場合と同じである。従って、SPCにより図4のCPCを構成するのと同様な構成をECPCを用いて実現することが可能である。その構成図を図7に示す。このような構成をCOMBEC(Combined ECPC)と呼ぶことにする。COMBECは2つの吸収面が円筒型であるため集熱に適している上、熱的に十分分離されており2段階集熱に適しているという長所がある。さらに、円筒型吸収面を有するCPCは、集光集熱器としては最も普及が進んでおり、製作上の問題点も少ない。

4. COMBECの光学的特性

COMBECの光学的特性を簡潔に表現する手段として、集光係数 C_F を導入する。 C_F は、COMBECの各吸収面に到達する集光量を、開口面への入射量の1/2で規格化した値である。従って、 C_F はECPCの原型となるCPC(原型CPC)の光学的集光比に対する比率を表す。図7のCOMBECでは、 C_F は次式のようになる。

$$C_F = 1 \pm |\sin\theta_1| / \sin\theta_{max} \quad (-\theta_{max} \leq \theta_1 \leq \theta_{max}) \quad (3)$$

ここで、 θ_1 は入射光の入射角であり、+サインは高集光モジュール(Main-module)を、-サインは低集光モジュール(Sub-module)を表す。図8に C_F を θ の関数として示す。同図より、高集光モジュールでは、許容半角内で平均すると原型CPCの約1.5倍の集光比を達成し得ることがわかる。従って、このような構成は高温領域での集熱に非常に効果的であるといえる。

ただし、図8では、鏡面の反射損失は考慮に入れていない。ここでは、CPCとの比較に重点があるので、ECPCの拡張鏡面の反射損失のみを考慮を入れる。COMBECでは、拡張鏡面の影響は高集光モジュールに対してのみ発生する。この点を考慮に入れると(3)式は次のように修正される。

高集光モジュール：

$$C_F = 1 + r_m |\sin\theta_1| / \sin\theta_{max} \quad (4)$$

低集光モジュール：

$$C_F = 1 - |\sin\theta_1| / \sin\theta_{max} \quad (5)$$

ここで、 r_m は鏡面反射率である。上式による集光係数 C_F を図9に示す。同図では $\theta_{max}=60^\circ$ で、 r_m が1.0と0.9の場合を図示している。これより、拡張鏡面での反射損失は、かなり小さいことがわかる。

5. COMBEC の集熱特性

5.1 瞬時特性

一般に集熱器の特性は次のような Hottel-Whillier-Bliss による HWB モデルにより表わされる⁽¹⁰⁾。

$$\begin{aligned} T_o &= T_a + \eta_{op} I_T A_a / U_L A_r \\ &+ (T_1 - T_a - \eta_{op} I_T A_a / U_L A_r) \\ &\times \exp(-F' U_L A_r / m C_p) \quad (6) \end{aligned}$$

ただし、 T_o ：集熱器出口温度、 T_1 ：集熱器入口温度、 T_a ：外気温、 m ：質量流量、 C_p ：熱媒体比熱、 I_T ：日射入力、 F' ：集熱器効率係数、 U_L ：熱損失係数、 η_{op} ：光学効率、 A_a ：開口面積、 A_r ：吸収面積である。ここで、光学効率 η_{op} とは集光系の集光効率や吸収面の吸収係数、透明カバーの透過率を含んだ入射光が吸収面に吸収されるまでの効率である。集熱器効率係数 F' は、吸収面から熱媒体への熱伝達の効

率を表す係数である。熱損失係数 U_L は、吸収面から外界への熱損失を表す係数である。

集熱器の瞬時集熱効率 η_t は、次式で与えられる。

$$\eta_t = m C_p (T_o - T_1) / I_T A_a \quad (7)$$

(6) 式を用いて T_o を消去すると、次式のようになる。

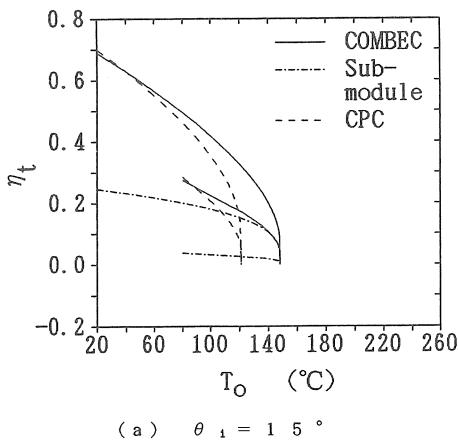
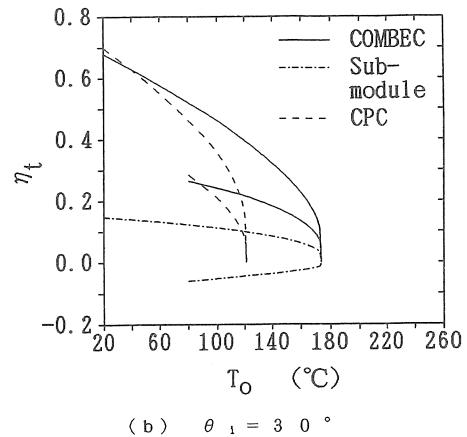
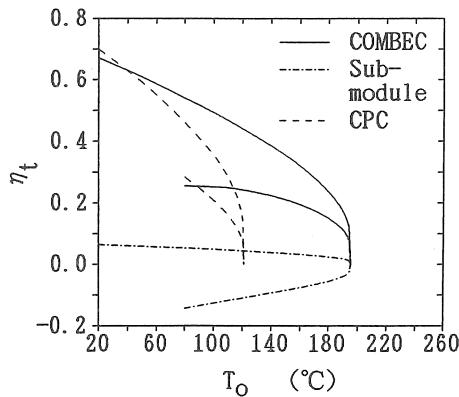
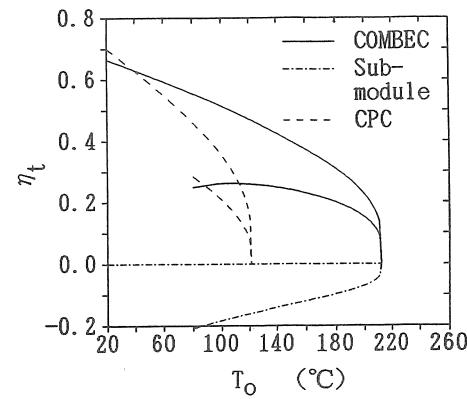
$$\eta_t = F_R \{ \eta_{op} - (T_1 - T_a) U_L / I_T \} \quad (8)$$

$$F_R = (m C_p / U_L A_a) \{ 1 - \exp(-F' U_L A_r / m C_p) \} \quad (9)$$

(8) (9) 式により、流量 m と入口温度 T_1 を与えれば、集熱効率 η_t を決定することができる。CPC の場合には、集光比 $A_a / A_r = 1 / \sin \theta_{max}$ であるから、 $A_a = 1$ 、 $A_r = \sin \theta_{max}$ を (6) ~ (9) 式に代入すれば単位開口面積あたりの集光特性が求められる。

まず、E CPC の原型となる CPC (原型 CPC) の特性を、以下のように設定する。

$\theta_{max} = 60^\circ$, $U_L = 4 (\text{W/m}^2\text{K})$, $\eta_{op} = 0.7$, $F' = 1$

(a) $\theta_1 = 15^\circ$ (b) $\theta_1 = 30^\circ$ (c) $\theta_1 = 45^\circ$ (d) $\theta_1 = 60^\circ$ 図 10 集熱効率 η_t と出口温度 T_o の関係 ($\theta_{max} = 60^\circ$)

基本的には同様であるが、拡張鏡面の影響を導入する必要がある。拡張鏡面は、各モジュールへの集光量の不等分配という役割を果たすが、それに伴い反射損失も生ずる。このような効果を簡潔に導入するには、(4) (5)式の集光係数 C_F を用いて日射入力 I_T を $I_T \cdot C_F$ と変更すればよい。ここで、 I_T は図 7 において \overline{AB} で示す COMBEC の開口面における入力密度であり、これは原型 CPC の入力密度とも等しい。

以上の手順により求められた熱効率曲線の比較を図 10 (a)～(d) に示す。同図では、 $I_T = 500 \text{ (W/m}^2\text{)}$ 、 $T_a = 20 \text{ (}^\circ\text{C)}$ 、 $r_m = 0.9$ として、入射角 $\theta_i = 15^\circ$ 、 30° 、 45° 、 60° 、 $T_1 = 20, 80 \text{ (}^\circ\text{C)}$ の各場合についての熱効率を出口温度の関数として示した。この場合、質量流量 m_{CP} は変数である。また、計算は単位面積当たりの入力と出力を計算することにより効率を算出した。集熱効率の計算においては、低集光モジュールの出口温度は高集光モジュールの入口温度と等しいとして、両者の流量は同一とした。図中の実線が COMBEC の集熱効率であり、一点鎖線は低集光モジュールの寄与分を示す。比較のために、原型 CPC の集熱効率も破線で示している。なお、 $T_o = 80 \text{ (}^\circ\text{C)}$ から始まる曲線は、入口温度 T_1 が 80°C の場合である。

図 10 より COMBEC は特に高温領域での集熱特性に優れていることがわかる。特に、集熱温度の上限が著しく上昇することは、高温領域における集熱性能の向上を端的に表している。同図で、 $T_1 = 80 \text{ (}^\circ\text{C)}$ の場合には、入射角度によっては、低集光モジュールの熱効率が負の値を示している。これは、低集光モジュールの入射量が小さい場合には、熱損失の方が集熱量を上回ることを示している。ただし、このような場合でも COMBEC の 2 つのモジュールの総合効率は、高温領域で原型 CPC を凌駕している。低集光モジュールの寄与がマイナスとなる影響は、入口温度が高く、入射角 θ_i が許容角の限界値 θ_{max} に近づくほど顕著になる。

COMBEC の最高性能は、 $\theta_i = \theta_{max}$ 、 $T_1 = T_a$ の時に得られる。この場合には、入射光は全て高集光モジュールへ集光され、光学的集光比は原型 CPC の 2 倍となる。そして、 $T_1 = T_a$ であるから低集光モジュールでの熱損失も 0 である。

5. 2 平均集熱効率

以上のように、COMBEC の集熱特性は入射角に応じて異なる。従って、時間的に平均化した集熱特性についても検討する必要がある。ここでは、1 つの例として日射入力の入射角分布が次式で与えられる場合について考える。

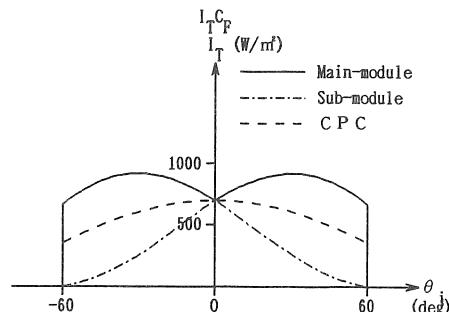


図 1-1 日射入力の入射角 θ_i に関する分布

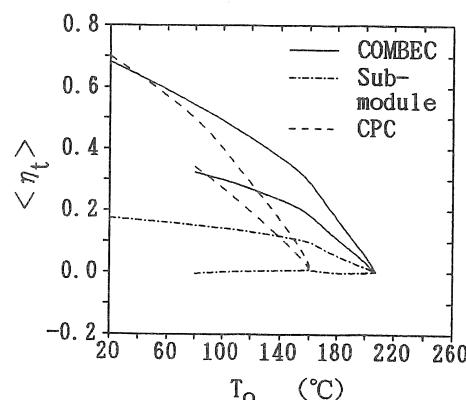


図 1-2 平均集熱効率 $\langle \eta_t \rangle$ と出口温度 T_o の関係

$$I_T(\theta_i) = I_{TP} \cos \theta_i \quad (-90^\circ \leq \theta_i \leq 90^\circ) \quad (10)$$

上式は、 θ_i が $-90^\circ \sim 90^\circ$ の範囲を時間に比例して 12 時間で変化する場合には、吸収管を南北軸に平行に設置する方式における典型的な日射入力の日変化を考える。図 1-1 に各モジュールと原型 CPC の日射入力を θ_i の関数として図示する。同図では、 $I_{TP} = 700 \text{ (W/m}^2\text{)}$ 、 $r_m = 0.9$ として、高集光モジュールへの日射入力 $I_T \cdot C_F$ の計算では、(3.4)式により拡張鏡面での反射損失を考慮にいれている。なお、高集光モジュールと低集光モジュールは $\theta_i = 0^\circ$ を境として交代する。

図 1-1 の入力分布を基に平均の集熱効率を算出する。その際、出口温度 T_o を固定して、入射角 θ_i について集熱量を積分する。平均効率の分母としては、許容角内の日射入力の積算値を採用する。すなわち、 $-60^\circ \leq \theta_i \leq 60^\circ$ の範囲の日射入力を分母として平均集熱効率を算出する。

図 1-2 に平均集熱効率 $\langle \eta_t \rangle$ の計算結果を、 T_o の関数として示す。同図より、COMBEC は高温部で

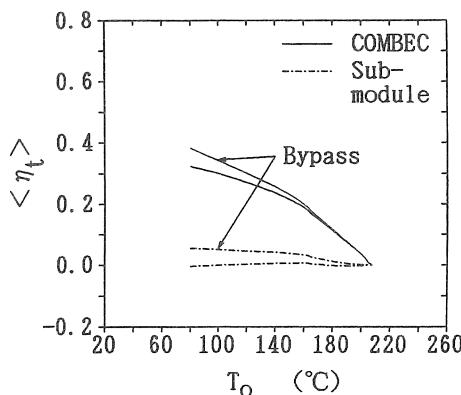


図13 低集光モジュールのバイパス効果

低集光モジュールの集熱効率が負になる場合に、バイパスを行う場合の効果。

の集熱特性に優れていることがわかる。特に、集熱温度の上限が150°C以上に上昇し、原型CPCが集熱不能となる温度においても20~30%の集熱効率を有することは注目に値する。

次に、COMBECの短所として、低集光モジュールの熱効率が負になる場合があるという点について考える。このような状況は、入口温度が高く、低集光モジュールへの集光量の少ない場合に起こる(図10参照)。その対策として、バイパス用の配管を設置し、低集光モジュールをバイパスするという方法が考えられる。このような対策を講じた場合の有効性を確認するために、平均集光効率の比較を行った。その結果を図13に示す。同図では、入口温度を80°Cとして、低集光モジュールの熱効率が負になる場合には、低集光モジュールをバイパスして高集光モジュールの入口温度を80°Cとするという集熱方式での平均集熱効率を図示し、図12の計算結果との比較を行っている。同図より、この方式による集熱効率の向上は、かなり小さいことがわかる。従って、低集光モジュールによる負の集熱効率は、さほど深刻な問題点ではないといえる。

以上ではアズソーバーを南北軸方向に設置する場合を中心に考えたが、COMBECの有効性は東西軸方向に設置する場合にも当てはまる。この場合には、日射入力の分布は必ずしも図11に示した形状とは類似せず、より許容角の周辺部の入力密度が高くなる可能性が高い。図10(a)~(d)に示すように、COMBECの有効性は許容角の周辺部の入射光に対して高くなる。従って、東西軸方向に設置する方が、さらにCOMBECの有効性が高まると考えられる。

本論文では、単位出力当たりに必要な構成材料を最

小にするという点からの最適化は行っていない。このような最適化は、短縮化したCPCを用いることにより可能である。ただし、COMBECでは、幾何学的集光比の小さいCPCを基に実質的な集光比を向上させることが主眼であり、集光比の小さいCPCは構造的に浅い構造であるため、深さ方向を短縮化する必要性は小さい。従って、通常のCPCと比較して、使用材料の最小化という点でも有利であると考えられるが、厳密には、COMBECの拡張鏡面との兼合いを考慮する必要がある。

また、CPCの鏡面形状をフィルム鏡の懸垂状態を利用して模擬し、低コスト化を図るという方法があり、その有望性が解析的に示されている⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。この方法もCOMBECに適用することが可能であり、その場合、高性能かつ低コストという2つの特性を有する集熱器を構成できる可能性がある。

6. まとめ

2つの非対称集光器を互いの許容角が対称に重なるように配置した構成において、両集熱器(モジュール)の内の集光量の低い方から高い方へと直列に二段階に集熱するという方式を採用した場合の有効性を評価した。このような構成の最も簡単な例として、くさび型の吸収面を持つCPCがある。二段階の集熱に適した非対称集光器として、CPCの1つの鏡面を直線的に拡張したE CPC(Extended CPC)を考え、これを結合させた形態の集熱器であるCOMBEC(COMBind E CPC)を提案し、集熱性能の解析を行った。

COMBECの集光性能に関して、2つのE CPCモジュールの内一方は、許容半角で平均すると対応するCPCの約1.5倍の集光比を実現し得ることが示された。

COMBECの集熱方式として、常に低集光モジュールから高集光モジュールへと集熱を行うという方式を採用することにより、集熱性能の飛躍的向上が可能であることが示された。COMBECは、特に高温部での集熱において大幅な性能向上をもたらし、対応するCPCが集熱不能となる温度においても十分な集熱効率を維持し得ることが示された。

COMBECと同様な構成法は、他の形状の非対称集光器を用いても実現することが可能である。しかし、CPCは固定型集光器の中では最も実用化が進んでいるタイプであるから、CPCに若干の付属品を追加して構成されるCOMBECは、最も実用化に適しているといえる。さらに、フィルム鏡の懸垂状態を活用し

て、大幅な低コスト化を図るという手段も適用可能である。このような低コスト化の可能性を包含しつつ、高い集熱性能を実現する手段として、C O M B E C は非常に有望な構成方法であると考えられる。

参考文献

- (1) A. Rabl, "Comparison of Solar Concentrators", *Solar Energy*, 18(1976), p. 93.
- (2) R. Winston, "Light Collection within the Framework of Geometrical Optics", *J. Optics. Soc. Am.*, 60(1970), p. 245.
- (3) D. R. Mills and J. E. Giutronich, "Asymmetrical Non-Imaging Cylindrical Solar Concentrators", *Solar Energy*, 20(1978), p. 45.
- (4) D. R. Mills, "The Place of Extreme Asymmetrical Non-Focussing Concentrators", *Solar Energy*, 21(1978), p. 431.
- (5) H. P. Baum, M. E. Blanco, E. Gomez-Leal and J. M. Gordon, "Optical Configurations of Asymmetrical CPC Solar Concentrators with Planar Receiver", *Solar Energy*, 36(1986), p. 187.
- (6) M. E. Blanco, E. Gomez-Leal and J. M. Gordon, "Asymmetric CPC Solar Concentrators with Tubular Receiver: Geometric Characteristics and Optimal Configurations", *Solar Energy*, 37(1986), p. 49.
- (7) R. P. Patera and H. S. Robertson, "Information Theory and Solar Energy Collection", *Appl. Optics*, 19(1980), p. 2403.
- (8) R. P. Patera, "Efficiency of Solar Collectors with Nonuniform Irradiance", *Solar Energy*, 28(1982), p. 539.
- (9) I. Oshida and A. Suzuki, "Optical Cascade Heat-Collection for Effective Solar Energy Gain", *ASME Journal of Solar Energy Engineering*, 109(1987), p. 298.
- (10) J. A. Duffie and W. A. Beckman, *Solar Energy Thermal Processes*, John Wiley and Sons, (1974), p. 120-153.
- (11) 藤原: 太陽エネルギー, 14, 5 (1988), p. 19.
- (12) 藤原: 電総研彙報, 53 (1989), p. 357.