

複合懸垂面集光器の集光特性

(南北軸水平設置)

Optical Performance of Compound Suspensory Concentrator
(Horizontal N-S Axis Setting)

藤原 正 純*

Masanori FUJIWARA

Abstract

A new type of solar concentrator, abbreviated as CSC, is proposed, which is composed by two suspensory film mirrors around the absorber pipe to resemble CPC. It is able to reduce either the material and the construction cost significantly by suspending a film mirror as a concentration method. The optical performance is analyzed by ray-tracing method, and the yearly collectable energy is evaluated based on the standard weather data at several locations in Japan. As a result, by selecting the proper suspensory configuration, CSC is able to attain 90~95% concentration performance compared with CPC. Especially, in the configuration of 90° acceptance angle, it is able to collect 93% of the global solar radiation. Therefore, it is concluded that the concept of CSC can be competitive with conventional flat plate collectors in the cost effectiveness.

Key Words: Optical Engineering, Solar Concentrator, Film Mirror, Ray-tracing, Concentration Efficiency.

1. はじめに

太陽熱集熱器は平板型と集光型に大別されるが、集光型には追尾集光型と固定集光型の2種類がある。追尾集光型の典型例には楕型放物面鏡を用いたパラボラトラフがあるが、追尾機構が必要である上、散乱光が利用できないという欠点を有する。

これに対し、固定集光型の典型例には、CPC(Compound Parabolic Concentrator)があるが、追尾集光型に比し集光性能は劣るが散乱光の一部が利用可能な上、追尾機構が不必要であるという長所を有する。

特に、2次元CPC(以下CPCは全て2次元CPCを指す。)は、所定の許容角に対して最大の集光比を与える理想集光器の一種である¹⁾。ただし、集光比の高いCPCでは短縮化(Truncation)が行われることが多く²⁾、また、熱損失の低減のため吸熱部と鏡面の間に間隔を持たせる構造が一般的である。この為、実用的なCPCは必ずしも理想的性能を有しない。CPCは一般に吸熱部に真空断熱が施され、平板型と追尾集光型の中間の集熱性能を有するが、パラボラトラフと同程度の性能を有するCPCの開発も進められている³⁾。

また、真空断熱を用いずに低コスト化を実現するという検討も行われている⁴⁾。

集光型は、平板型よりも高い温度での集熱に適しているが、集光に伴い散乱光の利用範囲が制限される。このため日射の利用率が減少し、年間総熱出力は平板型よりも小さくなる場合が多い。一方、太陽熱利用と競合関係にある化石燃料は、熱効率の温度依存性が小さい為、エネルギーコストの温度依存性が小さい。すなわち、化石燃料の代替効果は温度よりも熱量に大きく左右される。従って、集光型の代替効果は平板型よりも小さくなる場合が多く、平板型よりも低コストで供給する必要性が高い。

集光型は吸熱部の面積が小さい為、集光手段の大幅なコストダウンが実現すれば、平板型よりも低コストとなる可能性を有している。このような観点より、本論文では、集光手段の大幅なコストダウンの手段として、自然状態で懸垂させたフィルム状の反射鏡を用いることを提案している。具体的には、フィルム鏡を吸収管の周囲に懸垂させ、CPCの類似形状を実現すると

* 電子技術総合研究所 主任研究官
Electrotechnical Laboratory, Senior Researcher

いう集光系であり、複合懸垂面集光器 (Compound Suspensory Concentrator, 以下 CSC と略す) と命名している。

近年、ヘリオスタットやパラボラディッシュにおける集光系として、フィルム鏡の活用が進められている。集光系としては、フィルム鏡を基盤上に張り付ける方式⁵⁾の他に、フィルム鏡に張力を加えることにより平坦性を持たせる方式⁶⁾、フィルム鏡の裏面側圧力を減圧することにより所定の形状を維持するという方式⁷⁾が用いられている。これらは、追尾集光系である為、鏡面形状を所定の形状に高い精度で維持する必要がある。

これに対し、本論文で述べる CSC は、フィルム鏡を固定集光系に適用したものであり、鏡面形状も懸垂状態における自然発生形状を利用している。この為、鏡面を所定の形状に維持するためのプロセスが省略でき、製作費及び材料費の大幅なコストダウンが可能である。ただし、CSC は理想集光器には該当しない為、集光性能を明確に把握することが必要である。また、懸垂面の形状に自由度が大きく、形状の最適化も重要な課題である。

本論文は、CSC の太陽熱集熱器としての適用可能性を明確にすることを目的としている。この為、CSC の最も基本的な設置形態である吸収管を南北軸方向に水平に設置する場合について、集光性能の解析を行った。集光特性を光線追跡により求め、日本各地の標準気象データを基に年間の集光量を算出し、CPC との性能比較を行った。

なお、本論文では CSC の評価を同一集光比の CPC と比較することにより行っているが、CPC は幾何光学あるいは熱力学第二法則により理想的性能を有することが証明されている¹⁾。従って、CPC を基準として集光性能の評価を行うことは他の固定集光器との相対比較を行う上でも普遍的な評価基準を提供することになる。また、実用的観点からも、集光器としては最も普及の進んでいる CPC との相対比較は、実用化の可能性を検討する上で有意義な評価方法であると考えられる。

2. 基本構造及び特徴

本論文で述べる複合懸垂面集光器 (CSC) とは、図 1 に示したようにフィルム鏡を吸収管の周囲に懸垂させ、CPC の類似形状を実現させることを特徴とする集光器である。

2 次元 CPC は理想集光器の 1 種であり、許容角内の入射光は全て吸収管に到達し、それ以外の入射光は再び外へ放出される。幾何学的集光比は許容半角を $\theta_{\max}$ とすると $1/\sin \theta_{\max}$ で与えられる。

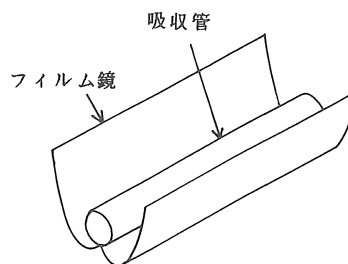


図1 CSCの構成概略図

このような固定集光系の大きな特徴として、非結像光学系であることが挙げられる。集光系は、必ずしも焦点を有する必要がなく、要求される鏡面の製作精度もかなり緩和される。従来、このような集光系を構成する手段として、CPC のように所定の形状に成型された鏡面が利用されてきたが、この部分が低コスト化を阻む大きな要因となっている。本論文で提案する CSC は、この点の解決を目的としたものである。

CSC の大きな特徴は、材料費と製作費の大幅なコストダウンが可能であることにある。必要材料を平板型と比較すると、集熱板の代わりに吸収管とフィルム鏡で構成され、裏側断熱材、底板も省略することが可能である。従って大幅な省資源化が可能である。製作費の面では、小容積で運搬負荷の小さい部品を用いて設置現場で容易に組み立てることができる。その上、フィルム鏡、吸収管、透明カバー等の部品が容易に交換可能である為、一部の材料の耐久性が不十分な場合にも、実用化が可能である。このように CSC は本質的に省資源・低コスト集熱器としての特質を有しており、ある程度の集光性能を備えていれば実用化する可能性が高い。

なお、通常の CPC や平板型と同じく、開口面の透明カバーと周辺部の側壁は必要である。これにより、風による懸垂面形状の変形、雨水の鏡面への影響が防止される。また、透明カバーにもフィルム状のものをを用い、設置現場で張り付けるという方式も考えられる。

CSC では反射面が鉛直方向に懸垂される為、基本形態としては吸収管を南北方向に設置することになる。なぜならば、東西方向に設置する CPC では、反射面が鉛直上向きに凸となる部分が存在し、懸垂面により模擬することは容易ではない。

本論文では、CSC の最も基本的な設置形態として水平設置の場合について考える。水平設置では南向き傾斜設置に比し、開口面積当たりの入射量は小さくなるが、集熱器の支持・据え付けが簡素化される。特に、支持架台を用いて集熱器を傾斜設置する場合には、風圧加重対策が必要となり、架台設置費用は CSC のよ

うに集熱器コストが安価な場合には重要なコスト要因となる。また、水平設置では大面積化が容易であり、その場合には、集熱器の敷地占有率が上がり、敷地と日射量の有効利用が図れる。従って、CSCのような低コスト集熱器を大規模に敷設する場合には水平に設置する可能性が高い。

3. 日射入力

固定集光型の集光器では、集光効率が入射角により異なる為、具体的な日射条件下における集光量の算出には日射入力の入射角度別の強度分布（入射角分布）を求める必要がある。CSCでは、吸収管に垂直な面（入射射影面）に射影した入力の入射角分布を求める必要がある。気象データとしては、HASP標準気象データ⁸⁾の高知、(新)東京、札幌のデータを用いた。HASPデータでは1時間間隔の法線面直達日射量 I_{BN} と水平面散乱日射量 I_{DH} が与えられているが、これらの年間積算値について入射射影面内における入射角分布を求めた。

本論文では、吸収管を南北方向に水平に設置する場合を考えているので、入射射影面は東西軸に平行な鉛直面と一致する。この面への入射光の射影が、鉛直線となす角を入射角 θ_i とする θ_i は、

$$\tan \theta_i = \sin A / \tan E \quad (1)$$

により与えられる。ただし、 E は入射光の高度、 A は方位角である。 A は真南からの入射時を0とし東側では負、西側では正とした。

直達日射入力の入射角分布は、入射角 θ_i 別に $I_{BN} \sin E$ を積算することにより求めた。太陽位置の計算はWalraven⁹⁾のサブルーチンを用いて1分間隔で行い、積算も1分間隔で行った。

散乱日射力の入射角分布は、天空輝度一様分布を仮定し、入射角 θ_i 別に $(I_{DH}/\pi) \cos E \sin E dE$

dA を積算することにより求めた。

図2に直立つ日射入力と全天日射入力の入射射影面における入射角分布を示す。同図において、入射角は 1° 分割で計算している。同図は開口面へ入力するエネルギー量を積算したものであり、 $|\theta_i| \geq 90^\circ$ では入力は0となる。図より、日射入力の入射角分布形状の地域較差は小さいことがわかる。

4. 鏡面形状

CSCにおける鏡面形状の算出に関しては、フィルム鏡が十分に柔らかく鉛直断面上では、純粋な懸垂線(Catenary)と一致するものとした。すなわち、フィルム鏡は、完全に柔軟であり、かつ応力に対する伸縮性がないと仮定している。懸垂線の方程式は2次元直交座標系を用いて C_1, C_2, C_3 という3つのパラメータにより次式で与えられる。

$$y = (C_1/2) \{ \exp\{(x - C_2)/C_1\} + \exp\{-(x - C_2)/C_1\} \} + C_3 \quad (2)$$

ただし、 y 軸が鉛直方向であり、原点の位置は任意である。(2)式の懸垂線上の任意の2点 (A_1, B_1) 、 (A_2, B_2) 間の距離 L は

$$L = (C_1/2) \{ \exp\{(B_1 - C_2)/C_1\} - \exp\{-(B_1 - C_2)/C_1\} - \exp\{(B_2 - C_2)/C_1\} + \exp\{-(B_2 - C_2)/C_1\} \} \quad (3)$$

で与えられる。懸垂線のパラメータ C_1, C_2, C_3 は、懸垂線の両端点の座標とその間の懸垂線の長さを与え、(2)(3)式を解くことにより求められる。

本論文では、許容半角 θ_{max} が $45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ の管状アプソバ(吸収管)を有するCPCを模擬している。幾何学的集光比はそれぞれ1.41, 1.15, 1.04, 1.0である。この型のCPC鏡面の方程式は展伸線(involute)と放物線に類似した曲線を結合した形状である¹⁰⁾。後者の曲線は、許容角の臨界値で入射する光が、1回反射の後、吸収管に接するという条件より求められる。

本論文では、CSCにおける開口面と吸収管の位置関係はCPCと同一に設定した。即ち、懸垂面の支持線は、CPCの鏡面の端線と同じ位置に設定した。この場合、対応するCPCの許容角を越える入射角度の光は、直接吸収管には当たらない。また、対応するCPCとCSCの幾何学的集光比は等しくなる。

図3に各CPCに対する懸垂面の断面形状を示す。同図では、反射面は左右対象である為、片側のみを示している。図中、 L_R は両端点の直線距離に対する懸垂線長さの比である。図より L_R の値を適当に選択することによりかなりの精度でCPCを模擬し得るこ

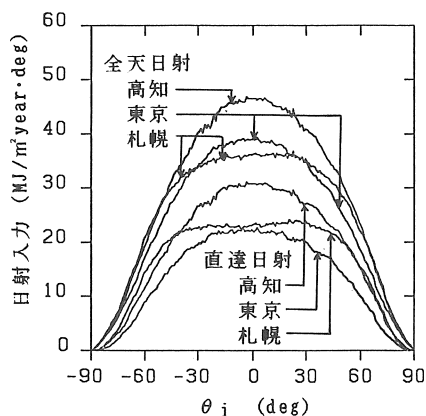
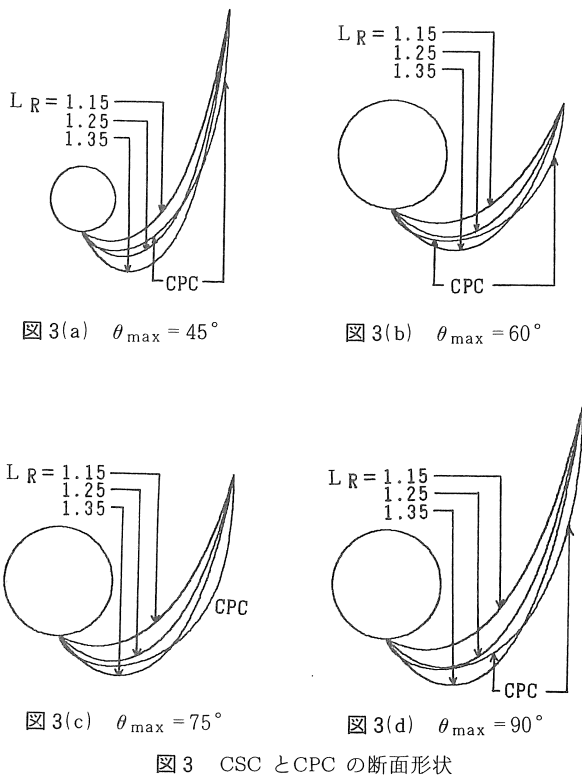


図2 日射入力の角度分布



とがわかる。

以下では、便宜上、CSCの分類を L_R 及び形状の対応するCPCの $\theta_{\max}$ という2つのパラメータにより行っている。

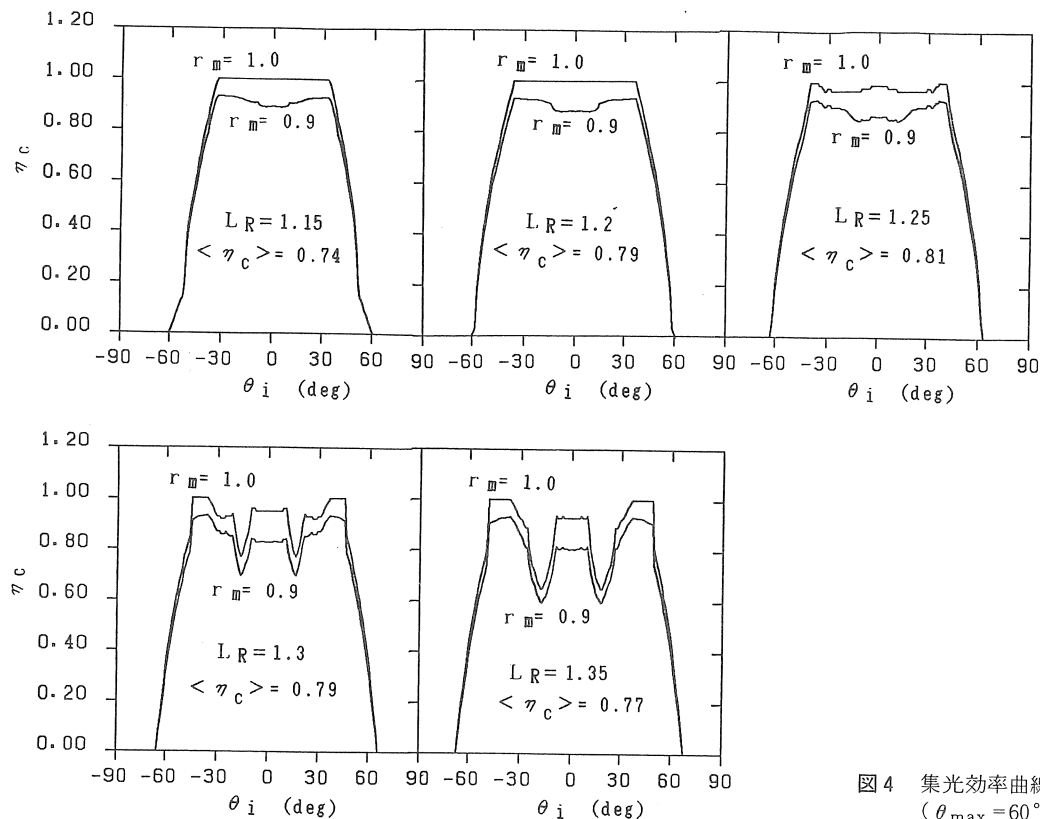
5. 集光性能

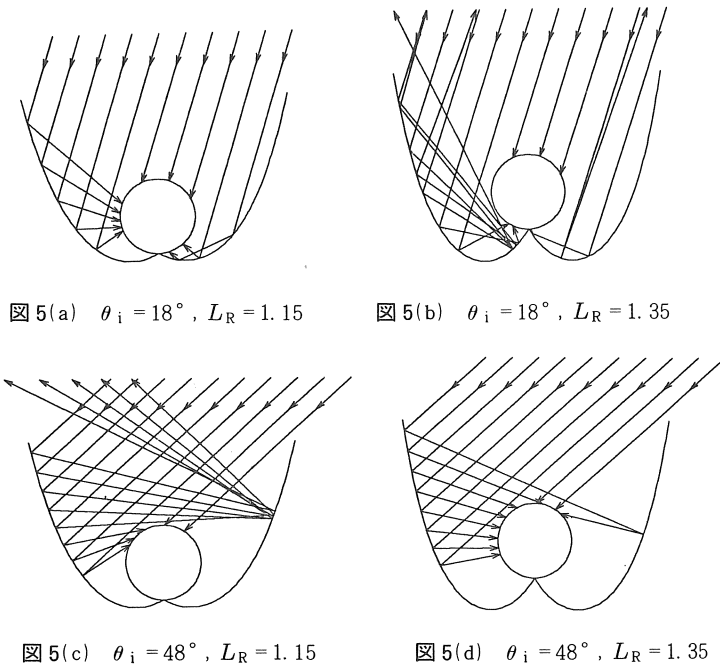
5.1 集光特性

図3のような断面形状を持つCSCについて、光線追跡を行い、集光効率を算出した。集光器は吸収管の長さ方向に十分長いものとし端効果は無視し、光線追跡は吸収管の垂直断面内で2次元に行った。集光効率 η_c は、ある一定の入射角 θ_i で入射する光線が吸収管に到達する割合で定義し、開口面上の入射位置による差異は平均化している。計算は、開口面を100分割し、入射角は 1° 間隔で行った。

図4に集光効率の入射角依存性（集光効率曲線）の例を示す。同図は、 $\theta_{\max} = 60^\circ$ の場合について、 L_R の変化に伴う集光効率曲線の形状変化の様子を示したものであり、鏡面の反射率 r_m が1.0と0.9の場合を図示している。CPCの場合には、 $r_m = 1.0$ とすると $\theta_i = \pm 60^\circ$ と $\eta_c = 1.0$ を結ぶ矩型となる。同図において中央部の微小な凹凸は計算上の誤差と考えられるが、1%程度の誤差であり、以下の計算に及ぼす影響は小さい。同図より、 $L_R \rightarrow$ 大に伴い集光可能な入射角の幅は拡大するが、その一方で、 $L_R \geq 1.3$ において中央部に2つの窪みが発生し、その窪みが L_R の増大と共に徐々に成長して行くことがわかる。

そこで、このような傾向の生ずる原因を調べるため

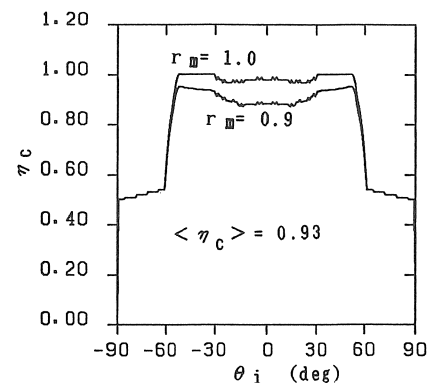
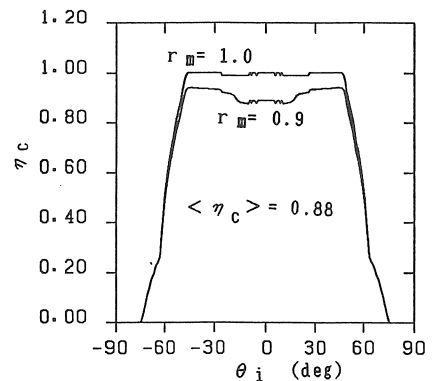
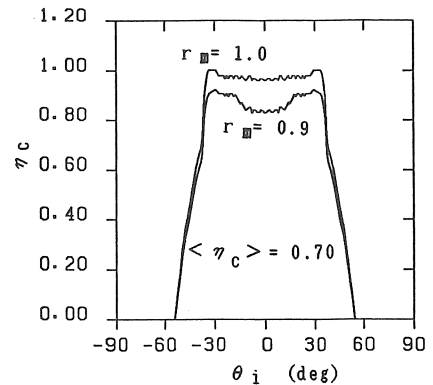


図 5 光線追跡の経過 ($\theta_{\max} = 60^\circ$)

に、 $\theta_i = 18^\circ$ と 48° の場合につき、光線追跡の経過を図 5 に図示した。図 5 (a)(b) より、集光効率曲線の中央部の窪みは、主として吸収管直下近傍の曲率の影響により発生することがわかる。一方、図 5 (c)(d) に示すように、 $L_R \rightarrow$ 大に伴い懸垂線の外側端部の傾きが鉛直に近くなる為、集光可能入射角の範囲が拡大することになる。CPC では、外側端部の鏡面の傾きは鉛直になるが、CSC では、内側の懸垂部分からの張力により斜めに傾斜する。この為、CSC の集光効率は、対応する CPC の許容角よりも小さい値で急激に低下することになる。

次に、集光効率の平均値について考える。CSC では、集光効率曲線に多様性があり、集光効率曲線の中央部の窪みと周辺部の効率の低下とは、日射入力に重みには違いがあり、同列には扱えない。そこで、具体的な日射条件下における集光効率の平均値 $\langle \eta_c \rangle$ を求めることにする。 $\langle \eta_c \rangle$ は、開口面への年間総日射入力 S_i に対する年間総集光量 S_c の割合で定義した。ここで、 S_c は吸収管へ到達する年間総集光量である。 S_c の値は、図 4 の集光効率曲線と図 2 の日射入力分布を掛け合わせることで得られる。

$r_m = 1$ の場合の各地の $\langle \eta_c \rangle$ は 0.89 である。これより、最も高い性能を有するのは、中央部の窪みの発生する直前の $L_R = 1.25$ の場合であることがわかる。同様の傾向は、他の $\theta_{\max}$ の場合にも見受けられるが、 $\theta_{\max} = 45^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ の場合については、図 6 に $\langle \eta_c \rangle$ を最大とする L_R についての集光効率曲線のみを図示

図 6 集光効率曲線 ($\theta_{\max} = 45^\circ, 75^\circ, 90^\circ$)

する。ただし、 L_R は 0.5 間隔で計算している。図 4, 6 より、適当な L_R の値を選択することにより、CPC と同程度の集光性能を達成し得ることが示唆される。

5.2 CPC との集光量比較

固定集光では、集光比を上げると許容角が狭まり集光量が減少する。すなわち、集光性能は集光比と集光量との兼ね合いにより定まる。最適集光比の算出には、集熱温度を決定し熱的解析を行う必要があるが、本論文では第一段階として、光学的解析による集光性能評価を目的としている。

集光量と集光比を統一的に評価するために、同一集光比のCPCを評価基準としてCSCの集光量を評価することにする。まず比較の基準となるCPCの年間総集光量 S_c を $\theta_{\max}$ の関数として図7に示す。CSCの年間総集光量については、対応するCPCの S_c により規格化した値を比集光量 R_{sc} と定義し、その計算結果を図8に示した。ただし、図7, 8の計算は、反射率を1として計算している。また、東京と高知の計算結果は上位2桁の範囲で一致した為、高知のデータは割愛した。これは、高知と東京は共に太平洋沿岸に位置する為、図2の日射入力分布の形状がほとんど同じ形状となることに起因する。

図8より、 L_R を適当な値に選択することによりCPCの90~95%程度の集光性能を達成し得ることがわかる。また、図3と図8の比較により、必ずしもCPCとの類似性の高い場合に集光性能が高くなるとは限らず、むしろ、 L_R は若干小さい方が有利であることがわかる。これは、鏡面の面積を縮小する方向であり、コスト的にも有利な方向である。

このように、CSCはCPCに迫る集光量を確保することが可能であり、フィルム鏡を懸垂させて集光系を構成するという概念の有効性が確認された。現実には、フィルム鏡の内部応力により、鏡面形状は純粋な懸垂形状とは一致しないが、この場合にも形状の選択により有効性の高い集光系を構成し得ると考えられる。また、CSCを傾斜面上に設置する場合も同様であると考えられる。

ただし、本論文では、南北軸水平設置という集光比及び日射入力密度の小さい設置形態について考えており、既存のCPCとの競合性は薄く、むしろ、平板型との競合性が強い。そこで、平板型との性能比較をより具体的に行う為、次に、集光過程における反射損失について考える。

5.3 反射損失

図4, 6には反射率が0.9の計算結果も示しているが、反射損失は入射角度により異なっている。また、同図では平均化されているが、入射位置によっても反射回数は異なる。そこで、平均反射回数 $\langle N_r \rangle$ を求めることにする。CPCのように明瞭な許容角を有する集光器では、通常、 $\langle N_r \rangle$ は許容角の範囲で反射回数を平均することにより求められる。しかしCSCでは、集光効率曲線が鏡面形状により著しく異なる為、この方法により求まる $\langle N_r \rangle$ と実際の反射損失との相関性が問題となる。そこで、 $\langle \eta_c \rangle$ と同様に具体的な日射条件下における反射損失より $\langle N_r \rangle$ を算出した。すなわち、 r_m が1.0と0.9の場合の具体的な総集光量

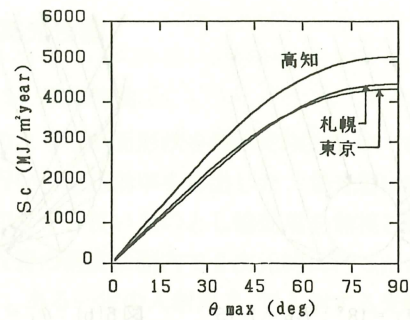


図7 CPCの年間集光量 S_c

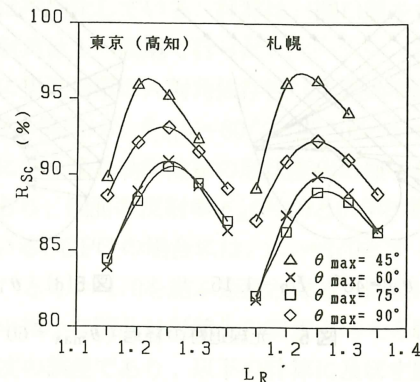


図8 CSCの年間集光量(CPC相対値)

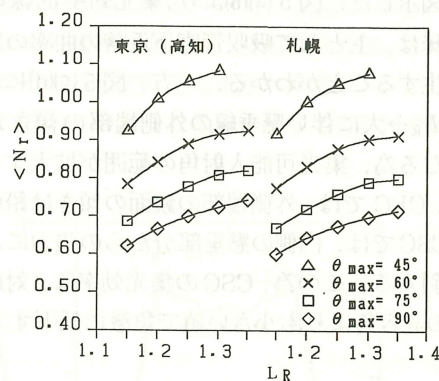


図9 平均反射回数 $\langle N_r \rangle$

S_c の比を基に、次式により $\langle N_r \rangle$ を算出した。

$$S_c|_{r_m=0.9} = S_c|_{r_m=1} \times (0.9) \langle N_r \rangle \quad (4)$$

上式は $r_m=0.9$ の反射損失に基づいた式であるが、この $\langle N_r \rangle$ により他の r_m に対しても反射損失を推定し得る。

$\langle N_r \rangle$ の計算結果を図9に示す。 $\langle N_r \rangle$ は S_c を基に算出している為、日射入力の角度分布に依存した値となるが、図9の地域間では大きな差は認められない。同図では、 $\theta_{\max} \rightarrow$ 小に伴い集光比が高くなるため $\langle N_r \rangle$ が増加しているが、同時に $L_R \rightarrow$ 大においても $\langle N_r \rangle$ は増加している。従って、この点からも L_R は小さい方が有利である。また、図9に示した $\langle N_r \rangle$ の値は、CPCの平均反射回数とほぼ同程度であると考えられる。

5.4 平板型との性能比較

南北軸設置の固定集光器は、許容入射角を広く採るために集光比を大きくすることが困難であり、性能的には平板型と競合関係にある。特に、 $\theta_{\max}=90^\circ$ の CSC は全天日射量を入力対象としており、平板型との直接比較が可能である。この場合の平均集光効率 $\langle \eta_c \rangle$ は、 $L_R=1.25$ おいて $r_m=1$ では 0.93、 $r_m=0.9$ では 0.87 と非常に高い効率を示し、集光に伴う入力損失は 1 割強である。

平板型と比較して、透明カバーの透過率、吸収面の吸収率、放射率に関する性能はほぼ同じ条件であるが、熱的性能に関しては、アブソーバが管型である為、熱媒体への熱伝達及びアブソーバの裏面からの熱損失という点で CSC の方が有利である。例えば、上記の 2 点により熱損失が 20% 減少すると仮定すると、平均の熱損失が入力の 40% を占める場合には、8% の出力の向上が見込まれる。従って、集光に伴う損失のかかなりの部分は熱損失の低減により補うことができる。

また、図 6(c) より入射角が 60° 以上では、集光効率が急激に低下し、約 50% となる。これは吸収管に直接吸収される入力である。入射角の大きい入力は、透明カバーの透過率が低下する上、直達成分は強度的に弱い入力が多く熱エネルギーとしての有効利用度が低くなる。従って、CSC は、有効利用度の高い日射を中心に活用していることになる。

以上より、 $\theta_{\max}=90^\circ$ の CSC は、平板型に近い集熱性能を有すると考えられる。集熱温度と日射条件によっては、 $\theta_{\max}$ を絞り集光比を上げる方が性能的に有利となる場合も多く、その場合には平板型と同程度以上の性能が期待し得る。

6. 結 論

フィルム鏡を自然状態で懸垂させることにより、CPC に類似の集光器を構成した複合懸垂面集光器 (CSC) を提案し、集光性能の解析を行った。

本集光器の特徴は、省資源・低コスト性にあり、運搬負荷の小さい材料を用いて設置現場で容易に組み立てることができる。従って、従来の平板型集熱器と比較して材料費・製作費の両面で大幅なコストダウンが可能である。

性能解析は、吸収管を南北方向に水平に設置する形態で、許容半角が 45° 、 60° 、 75° 、 90° の各 CPC に類似した形状について行い、以下のような結論を得た。

懸垂面形状を適当に選択することにより CPC の 90～95% 程度の集光量を確保することが可能である。

懸垂面の長さは、CPC に最も類似した形状よりも

若干短い方が集光性能が高くなる。

集光比を 1 とする形状では、鏡面反射率 0.9 において全天日射入力の 87% 程度を吸収管に到達させ得る。

以上より、フィルム鏡を懸垂させて CPC に類似した集光系を構成するという概念の有効性が確認されると共に、平板型集熱器と同程度の集熱性能が可能であることが示された。従って、今後の研究開発の進展により、実用化・普及する可能性を十分に有すると考えられる。

終わりに、本研究の遂行にあたり有意義な御意見を頂いた電子技術総合研究所の関係各位並びにセンチュリサーチセンタ ㈱ の竹村建造氏に深謝致します。

参 考 文 献

- 1) A. Rabl, "Comparison of Solar Concentrators", Solar Energy, Vol. 18, p. 93-111 (1974)
- 2) M.J. Carvalho et al., "Truncation of CPC Solar Collectors and its Effect on Energy Collection", Solar Energy, Vol. 35, p. 393-399 (1985)
- 3) K.A. Snail et al., "A Stationary Evacuated Collector with Integrated Concentrator", Solar Energy, Vol. 33, p. 441-449 (1984)
- 4) M.J. Carvalho et al., "Economic Optimization of Stationary Nonevacuated CPC Solar Collectors", ASME Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 109 p. 40-45 (1987)
- 5) P.T. Overly, "Acurex Innovative Point Focus Solar Concentrator", US DOE Report, SAND-86-0536, p. 258-268 (1986)
- 6) L.M. Murphy, "Stretched-Membrane Helio-stat Technology", ASME Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 108 p. 252-256 (1986)
- 7) K.H. Armstrong, "Stressed Membrane Helio-stat", US DOE Report, SAND-86-0536, p. 84-89 (1986)
- 8) 田中 授, 「HASP 標準気象データにおける日射データ」, 太陽エネルギー, Vol. 9, No. 4, p. 20-28 (1983)
- 9) R. Walraven, "Calculating the Position of the Sun", Solar Energy, Vol. 20, p. 393-397 (1978)
- 10) A. Rabl, "Solar Concentrators with Maximal Concentration for Cylindrical Absorbers", Applied Optics, Vol. 15 p. 1871-1873 (1976)

(昭和 63 年 2 月 19 日 原稿受理)