

太陽電池と熱電素子を用いた宇宙用 光・熱ハイブリッド発電の研究

Photo-Thermal Hybrid Module with Photovoltaic Cells and Thermoelectric Devices for Space Application.

塚 本 守 昭*

Moriaki Tsukamoto

林 原 光 男*

Mitsuo Hayashibara

Abstract

A feasibility study is carried out to investigate the performance of a photo-thermal hybrid module for space application. The hybrid module consists of photovoltaic cells (PV), thermoelectric devices (TEM) and a solar concentrator. The analytical and experimental results show that the hybrid module is able to have higher efficiency than a concentration type GaAs system.

Key Words Space Engineering, Energy, Photovoltaic Cell, Thermoelectric Device, Photo-Thermal Hybrid Module

1. 緒 言

太陽電池は人工衛星の最も一般的な電源の一つであり、その軽量化、高効率化の研究が進められている。しかし、人工衛星は今後ますます大型化し、大電力を必要とすることが予想される。それに伴って、大面積の太陽電池が必要となるが、太陽電池の面積が大きいほど空気抵抗、重力傾度、光圧等の外乱を受け、人工衛星の軌道及び姿勢を乱す主な原因となる。この乱れを修正するための推進薬の搭載量は、ロケットの能力、ミッション機器の重量等によって制限される。したがって、電源の小型化によって軌道上での外乱を小さくすることは人工衛星の長寿命化だけでなく、より多くのミッション機器の搭載を可能にする。そのため、より高性能な電源の開発が期待されている。

熱電素子は、放射線同位元素などと組合せて惑星探査衛星等の電源として用いられているが、その効率は4~7%と必ずしも高くはない。しかし近年、従来に比較して一桁以上性能指数を向上できる可能性が指摘されている。^{1), 2)}

太陽電池、熱電素子とも静的な機器であり高い信頼性を期待できる。そのため、保守の困難な人工衛星の

発電方式として適していると考えられる。そこで、高効率熱電素子が実用化されることを前提に、太陽電池と熱電素子を組合せることによる効率向上の可能性を実験及び計算により検討した。太陽電池と熱電素子を組合せた発電方式を、本報告では光・熱ハイブリッド発電と呼ぶこととする。

2. 記 号

I_0 : 太陽光強度 [$\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$]

A_0, A_R : 反射鏡開口面積及び放熱面積 [cm^2]

A_P : 太陽電池の面積 [cm^2]

C : 集光比 ($= A_0 / A_P$)

E_R : フイン効率

R_P : 反射鏡の反射損失率

T : 温度 [K]

Q_{LS} : 太陽電池表面からの放熱量 [W]

Q_P, Q_T : 太陽電池、熱電素子による発電量 [W]

Q_H, Q_C : 热電素子への流入熱量、流出熱量 [W]

α_M : 反射鏡の吸収率

σ : ステファン・ボルツマン定数 [$\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$]

*日立製作所 エネルギー研究所
Energy Research Laboratory, Hitachi, Ltd. Researcher

ϵ_P, ϵ_R : 太陽電池, 放熱板の輻射率
 η_{P0} : 基準温度 T_0 における太陽電池の発電効率
 α_P : 発電効率の温度係数 [K^{-1}]
 N : 熱電素子対(直列)の数
 L : 熱電素子の厚み [cm]
 S_P, S_N : P型, N型熱電素子のゼーベック係数
 $[V \cdot K^{-1}]$
 ρ_P, ρ_N : P型, N型熱電素子の比抵抗 [$\Omega \cdot cm$]
 A_T : P型, N型熱電素子の断面率 [cm^2]
 λ_P, λ_N : P型, N型熱電素子の熱伝導度
 $[W \cdot cm^{-1} \cdot K^{-1}]$
 R_o, R_L : 热電素子(モジュール)の内部抵抗及び
負荷抵抗 [Ω]

3. 光・熱ハイブリッド発電の構成

光・熱ハイブリッド発電ではその発電部を太陽電池, 熱電素子, 及び放熱部の積層構造とし, 反射鏡, レンズ等により集光した太陽光を太陽電池に入射して発電すると共にその温度を適度に上昇させる。これにより熱電素子の高温接合部と低温接合部との間に温度差を生じさせて、熱電素子で発電する。

光・熱ハイブリッド発電を宇宙用電源に適用する場合の構造例を図1に示す。同図において複数のフレネル式反射鏡が太陽光の入射方向に対して45度に設定され、それぞれの反射鏡の裏面に太陽電池と熱電素子より構成された発電素子が配置されている。反射鏡の放熱効率を高めるためその裏面は黒化処理、反射面は銀蒸着面の上にアルミナ、シリカ等のコーティングを施す。

フレネル式反射鏡で集光された太陽光は、一つ前の反射鏡の裏面に配置された発電素子に入射する。これにより、反射回数を一回とし、かつ、放熱板を反射鏡に兼用させることができる。また、人工衛星の打ち上げ時には反射鏡を折り畳むことにより、コンパクト化

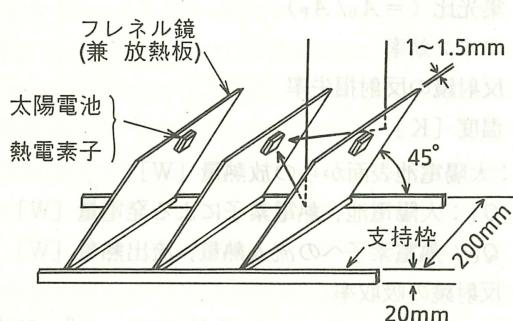


図1 光・熱ハイブリッド発電ユニットの構成検討例

できる。

太陽電池と熱電素子の電気的接続法としては、次に示す3つの方法が可能である。

(a) 太陽電池と熱電素子からの出力をそれぞれ独立に負荷に接続する方法

本方法はそれぞれの特性に合わせた最適な運用が可能である。配線はそれぞれ独立に必要である。

(b) 太陽電池と熱電素子を直列に接続する方法

本方法は高い電圧を取り出すことができるが、太陽電池と熱電素子の最適負荷電流を一致させる必要がある。

(c) 太陽電池と熱電素子を並列に接続する方法

本方法は太陽電池と熱電素子の最適負荷電圧を一致させる必要がある。

これらの方法のうち、太陽電池と熱電素子の特性の整合、電力調整の容易さ等から(a)の方法が適していると考える。

4. 発電特性の解析方法

光・熱ハイブリッド発電素子のヒートバランス概念図を、図2に示す。以下、同図をもとに光・熱ハイブリッド発電素子の特性解析法について述べる。ただし、次の前提および仮定をおいて解析を簡略化した。

1) 宇宙空間での使用を考え、素子及び放熱板からの放熱は輻射伝熱のみによるとする。

2) 熱電素子で発生するトムソン熱は、ジュール熱およびペルチエ熱に比較して小さいため無視する。この仮定のもとでは、熱電素子で発生するジュール熱は高温側と低温側に半分づつ伝わる。

発電素子のエネルギーバランスは次式で表される。

$$I_0 A_0 = I_0 A_0 R_P + Q_{LS} + Q_P + Q_T + Q_C \quad (1)$$

また、反射鏡兼放熱板のエネルギーバランスは、次式で表される。

$$I_0 A_0 = I_0 A_0 R_P + Q_{LS} + Q_P + Q_H \quad (2)$$

ここで、 I_0 は太陽光強度、 A_0 は受光面積、 R_P は反射率、 Q_{LS} は太陽電池の放熱量、 Q_P は太陽電池の出力、 Q_T は熱電素子の出力、 Q_C は熱電素子の放熱量、 Q_H は反射鏡兼放熱板の放熱量である。

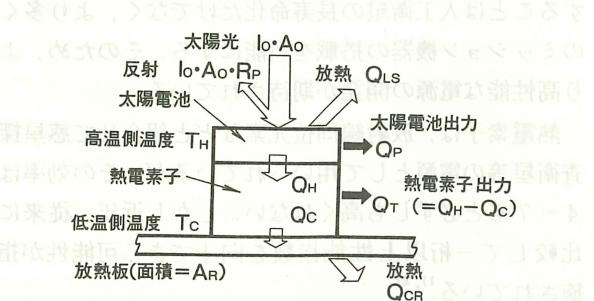


図2 ヒートバランス概念図

$$I_0 A_0 \alpha_M + Q_C = A_R E_R \sigma \epsilon_R T_C^4 \quad (2)$$

ここで、 Q_{LS} 、 Q_P は次式で与えられる。

$$Q_{LS} = A_0 \sigma \epsilon_p T_H^4 / C \quad (3)$$

$$Q_P = I_0 A_0 (1 - R_p) \eta_p \times \{ \eta_{PO} - \alpha_p (T_H - T_0) \} \quad (4)$$

一方、 Q_H と Q_C は熱電素子の特性よりそれぞれ次式で与えられる。³⁾

$$Q_H = NS IT_H - I^2 R_0 / 2 + K (T_H - T_C) \quad (5)$$

$$Q_C = NS IT_C + I^2 R_0 / 2 + K (T_H - T_C) \quad (6)$$

ここで、熱電素子を流れる電流 I は、

$$I = \frac{V_{OC}}{R_0 + R_L} = \frac{NS (T_H - T_C)}{(1 + M) / R_0} \quad (7)$$

式(7)を式(5)、(6)に代入して次式を得る。

$$Q_H = \frac{N^2 S^2 (T_H - T_C) T_H}{R_0 (1 + M)} \cdot \left\{ 1 - \frac{T_H - T_C}{2 T_H (1 + M)} + \frac{(1 + M)}{Z T_H} \right\} \quad (8)$$

$$Q_C = \frac{N^2 S^2 (T_H - T_C) T_C}{R_0 (1 + M)} \cdot \left\{ 1 + \frac{T_H - T_C}{2 T_C (1 + M)} + \frac{(1 + M)}{Z T_C} \right\} \quad (9)$$

また、 $Q_T = Q_H - Q_C$ より、熱電素子の出力 Q_T として次式を得る

$$Q_T = \frac{MN^2 S^2 (T_H - T_C)^2}{(1 + M)^2 R_0} \quad (10)$$

ただし、

$$S = (S_p + S_n)$$

$$R_0 = N L (\rho_p + \rho_n) / A_T$$

$$K = N (\lambda_p + \lambda_n) A_T / L$$

$$Z = S^2 / \{ (\lambda_p + \lambda_n) (\rho_p + \rho_n) \}$$

$$2NA_T = A_0 / C$$

$$M = R_L / R_0$$

なお、熱電素子の物性値は高温側と低温側の平均温度における値を用いた。

以上の基礎式より T_H と T_C 求め、太陽電池による発電量 Q_P および熱電素子による発電量 Q_T を求めることができる。

光・熱ハイブリッド発電素子の発電効率 η は次式で定義する。

$$\eta = \frac{Q_P + Q_T}{I_0 A_0} \quad (11)$$

5. 発電特性の基礎実験

光・熱ハイブリッド発電では、温度依存性の小さい太陽電池と、その太陽電池の使用可能な温度範囲で効率の高い熱電素子が必要である。GaAs 太陽電池は Si 太陽電池に比較して温度依存性が小さく、現段階では光・熱ハイブリッド発電に最も適した太陽電池と考える。

熱電素子の候補としては、図 3 に示す a-ZnSb、a-FeSi (a- : アモルファス) などが BiTe に比較して高い性能指数を示すことから有力と考える。しかし、同図に示した a-ZnSb 及び a-FeSi 热電素子は開発中の素子¹¹²⁾であり、実用化には至っていない。そこで、現段階で入手可能な GaAs 太陽電池と BiTe 热電素子を用いて光・熱ハイブリッド発電素子を構成し、ハイ

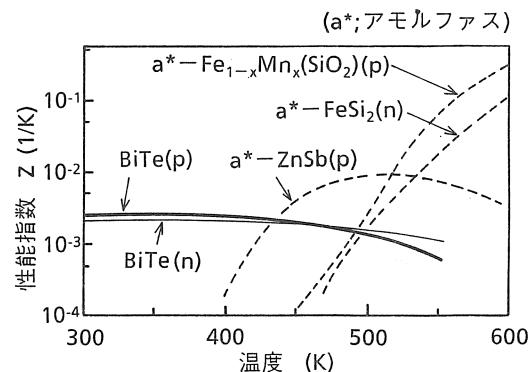


図 3 热電素子の特性

ブリッド化による効率向上を確認するためその発電特性を試験した。

5.1 実験方法

光・熱ハイブリッド発電素子の太陽電池として、集光用の電極パターンを設けた GaAs 太陽電池（寸法 $20 \times 20 \times 0.28$ mm, ヘテロフェイス構造の AlGaAs/GaAs 太陽電池）を用いた。この GaAs 太陽電池と BiTe 热電素子（ユニット寸法 $21 \times 21 \times 4.6$ mm, サーモボニック製）を高温用接着剤（アロンセラミック-D）で接合し、BiTe 热電素子の低温側を冷却用銅板を通して水冷した。また、各部の温度を測定するため、太陽電池と热電素子の接合部に厚さ $50 \mu\text{m}$ のシート状熱電対を、热電素子の高温側と低温側電極及び冷却用銅板に $0.2 \text{ mm} \phi$ の熱電対（素線）を設置した。

光・熱ハイブリッド発電素子の特性試験では図 4 に示すように、ソーラシミュレータからのほぼ平行に近い光（光ビームの光軸に対する最大角度 $< 2^\circ$ ）をフレネル・レンズ（焦点距離：160mm）により集光し、フ

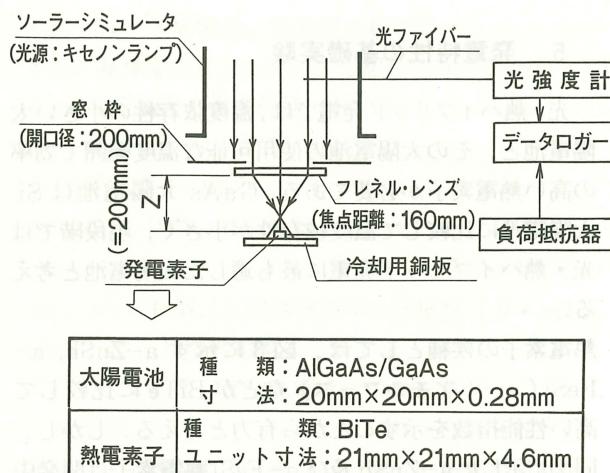


図4 特性試験装置の概略図

レネル・レンズから200mmの位置に設置した光・熱ハイブリッド発電素子に入射させた。太陽電池および熱電素子のそれぞれ単独の特性試験においても、フレネル・レンズから200mmの位置に太陽電池および熱電素子を設置して試験した。光・熱ハイブリッド発電素子に入射する光の強度（発電素子への入射光強度） I_c (W/cm^2) は、光入射面位置における光強度分布を測定することにより求めた。

5.2 実験結果およびその検討

(1) 太陽電池および熱電素子の基本特性

冷却用銅板に直接接合して冷却した場合のGaAs太陽電池出力の入射光強度依存性測定結果を図5に示す。同図に示すように、太陽電池出力 Q_P は入射光強度にほぼ比例して増加する。また、GaAs太陽電池の温度依存性を測定するため、GaAs太陽電池を冷却用銅板に直接接合し冷却用銅板を水冷した時の太陽電池の出力 Q_{PH} と、同一照射条件のもとで冷却用銅板を自然空冷とし温度が高い時の太陽電池の出力 Q_{PH} を測定し、その比 Q_{PH}/Q_{PC} (=相対出力) を求めた。測定結果を図6に示す。なお、同図の横軸は、冷却板温度の測定値をもとに太陽電池の厚みと接着層の熱抵抗を考慮して計算により求めた太陽電池の表面温度である。^[12]

図6に示すように相対出力 Q_{PH}/Q_{PC} は太陽電池温度が約340Kまではほとんど低下せず、それ以上の温度では温度上昇によって直線的に低下している。この直線的に低下している温度領域の温度係数 α_{PH} は $(1.8 \pm 0.2) \times 10^{-3}/\text{K}$ であり、300~450Kにおける平均の温度係数 α_{PA} は $(1.2 \pm 0.1) \times 10^{-3}/\text{K}$ であった。^[10]

BiTe熱電素子の低温側を冷却用銅板に接合し、集光した光を高温側に入射することにより、BiTe熱電素子(21×21mm)の出力特性を測定した。測定結果を図7に示す。同図に示すように熱電素子の高温側温度 T_H

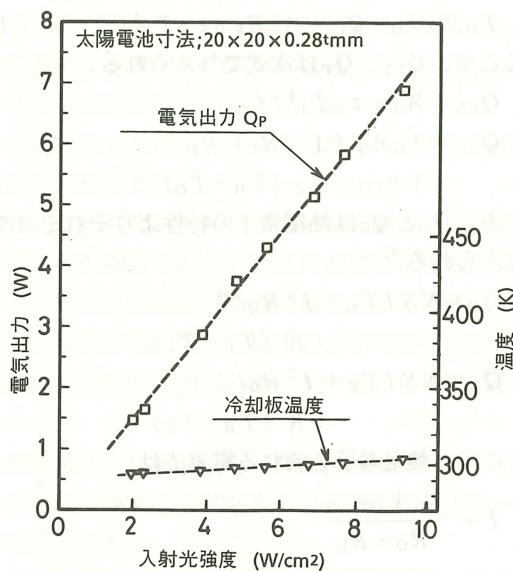


図5 GaAs太陽電池出力の入射光強度依存性

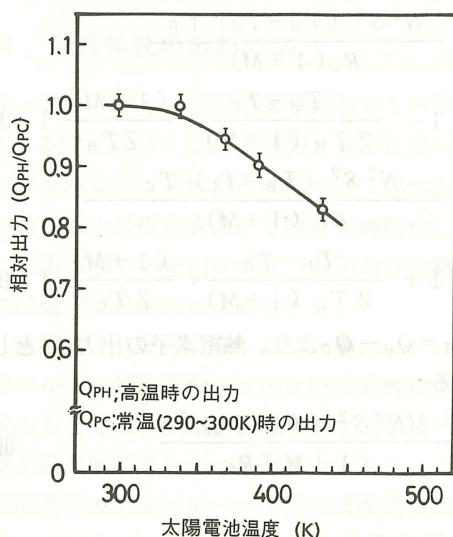


図6 GaAs太陽電池出力の温度依存性

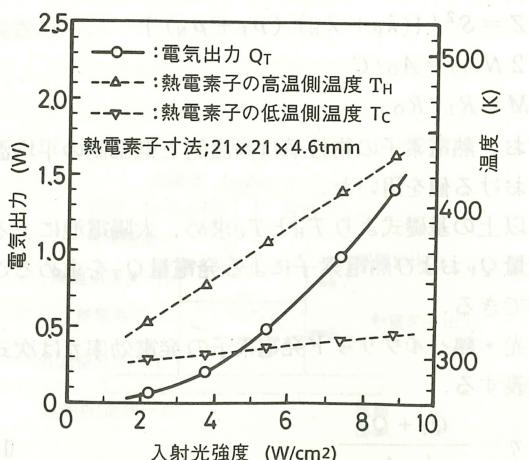


図7 BiTe熱電素子の出力特性

と低温側温度 T_c はそれぞれ入射光強度に比例して上昇し、熱電素子出力 Q_T は入射光強度のほぼ 2 乗に比例して上昇している。しかし、太陽電池の出力（図 5）と比較すると、1/5 程度である。

(2) 光・熱ハイブリッド発電素子の特性

熱電素子では、負荷抵抗値が熱電素子の内部抵抗値に等しい時出力が最大となる。この内部抵抗値の温度依存性は熱電素子の使用温度範囲では $3 \times 10^{-3} / K$ (BiTe 热電素子) と比較的小さい。そこで、光・熱ハイブリッド発電素子の出力特性の測定では、熱電素子の負荷抵抗として内部抵抗に等しい抵抗値を持つ固定抵抗器を接続して熱電素子の最大出力 Q_T を測定した。

一方、太陽電池の最大出力を与える最適負荷抵抗値は、同一の太陽電池であっても入射光強度、温度によって変化する。そこで、太陽電池には可変抵抗器を接続して $V - I$ 特性（電圧-電流特性）を測定することにより、太陽電池の最大出力 Q_P を測定した。

上記の方法により Q_P と Q_T を同時に測定して、光・熱ハイブリッド発電素子の出力 Q_{HB} ($= Q_P + Q_T$) を測定し、効率 η_{HB} ($= Q_{HB} / (I_C A_{HB})$, A_{HB} = 発電素子の受光面積) を求めた。測定結果を図 8 に示す。また、同図には前述の解析法を適用した解析結果と、図 5 より求めた GaAs 太陽電池単独時の効率 η_P を合わせて示した。なお、 Q_{HB} の測定誤差は約 ±1.5% (相対値) である。この測定誤差は、入射光強度の変動 (約 ±0.25%), 設定誤差 (約 ±1%) などに起因している。

図 8において、光・熱ハイブリッド発電素子の効率 η_{HB} と GaAs 太陽電池単独時の効率 η_P を比較すると、2 ~ 6 W/cm² の入射光強度範囲では $\eta_{HB} > \eta_P$ であり、ハイブリッド化により効率が向上している。入射光強度が約 4 W/cm² のとき、この効率の向上分は約 5% (相対効率) であった。この結果から、太陽電池と熱電素子のハイブリッド化により発電効率の向上が可能なことを、実験により確認できた。しかし、入射光強度が 6 W/cm² 以上の領域では逆に $\eta_{HB} < \eta_P$ となり、ハイブリッド化により効率が低下している。この原因は、BiTe 热電素子の効率が充分でないため、図 6 に示した太陽電池の温度依存性による効率低下分を BiTe 热電素子では補いきれないためである。これらの傾向は解析結果とほぼ一致しており、解析法の妥当性も確認できたと考える。

6. 宇宙用電源としての可能性

宇宙用電源の主な性能指標としては、比面積 (単位

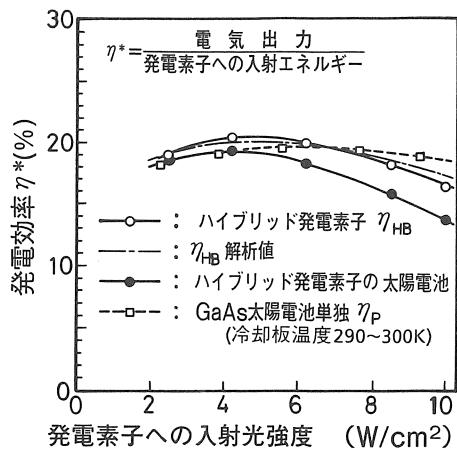


図 8 光・熱ハイブリッド発電素子の効率 (測定値)
(GaAs 太陽電池/BiTe 热電素子)

出力当たりの発電アレイ面積) と比重重量 (単位出力当たりの重量) がある。宇宙用電源としては、軌道上の空気抵抗の低減及び打ち上げコストの低減の観点から比面積及び比重重量は小さいことが必要であるが、これらは発電効率を向上することにより小さくできる。そこで、開発中の素子ではあるが、BiTe 热電素子より高い性能を期待できる a-ZnSb 及び a-FeSi 热電素子と GaAs 太陽電池を組合せた場合の発電特性を解析し、宇宙用電源としての可能性を検討した。なお本解析では、太陽電池出力の温度依存性として図 6 に示した実験値を高温域まで外挿して用い、热電素子の特性として図 3 に示した特性を用いた。また光・熱ハイブリッド発電素子の構成として図 1 の構成を想定し、放熱板の温度 T_c は 330 K、太陽光強度は 0.138 W/cm² とした。ここで、放熱板の温度 330 K は、図 1 に示したフレネル鏡兼放熱板の両面からの輻射放熱を考え、発電効率 η を約 20% と想定したときの平衡温度に相当する。

GaAs 太陽電池に a-ZnSb 热電素子を組合せた場合と a-FeSi 热電素子を組合せた場合の発電特性解析例を図 9 及び図 10 に示す。なお、これらの図には解析で用いた GaAs 太陽電池単独の場合の非集光時 (太陽電池温度: 300 K) と 100 倍集光時 (太陽電池温度: 約 370 K) の発電効率を合わせて示した。非集光時に比較して集光時の発電効率が低下しているのは、主として集光による光学的損失 (10%) のためである。また、ハイブリッド発電素子の特性は热電素子の厚みに大きく依存するので、热電素子の厚み L をパラメータとして示した。

a-ZnSb 热電素子と組合せた場合には、図 9 に示すように GaAs 太陽電池単独時より発電効率を向上させることは困難であることがわかる。これは、热電素子の性能がまだ不十分であるため、太陽電池の温度上昇

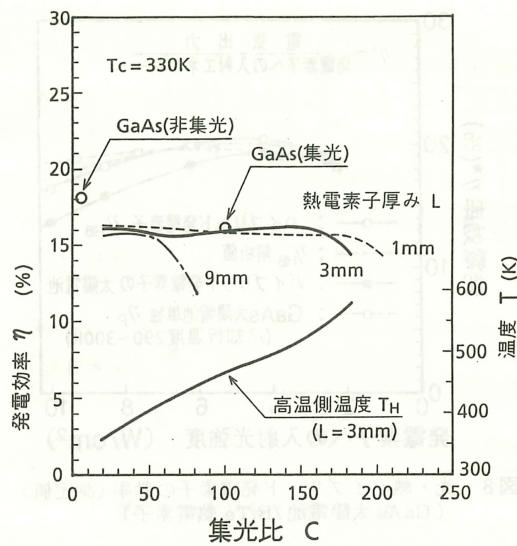


図9 発電効率の集光比依存性(計算値)
(GaAs 太陽電池/a-ZnSb 熱電素子)

による効率低下を熱電素子で補いきれないためである。a-FeSi 熱電素子と組合せた場合には、図10に示すように GaAs 太陽電池単独時及び集光時より発電効率を向上できる可能性があることがわかる。例えば、熱電素子の厚みを 3 mm, 集光比を 180 とすることにより、発電効率として約 20% を期待できる。

しかし、この時の高温側温度(太陽電池温度) T_H は約 550 K に上昇している。そのため、a-FeSi 熱電素子とハイブリッド化するためには、GaAs 太陽電池の耐熱温度(現状では電極材料の融点で制限され、約 450 K)を 550 K 以上とするか、a-FeSi 熱電素子の性能の高い温度領域を低温側にシフトさせる必要がある。後者に対しては、a-FeSi 熱電素子の Si の割合を調整することにより可能であるという報告^{11,12)}がある。したがって、GaAs 太陽電池の電極材料の改良、FeSi 熱電素子の性能の高い温度領域の低温側へのシフトなどにより、対策可能と考える。

図1に示したハイブリッド発電ユニットで発電アレイを構成したときの、比重試算結果を表1に示す。比重試算の前提条件として、集光比 180、熱電素子の厚み 3 mm、発電効率 20%とした。また、フレネル鏡(アルミ合金)の厚みとして、ヒートパイプを応用

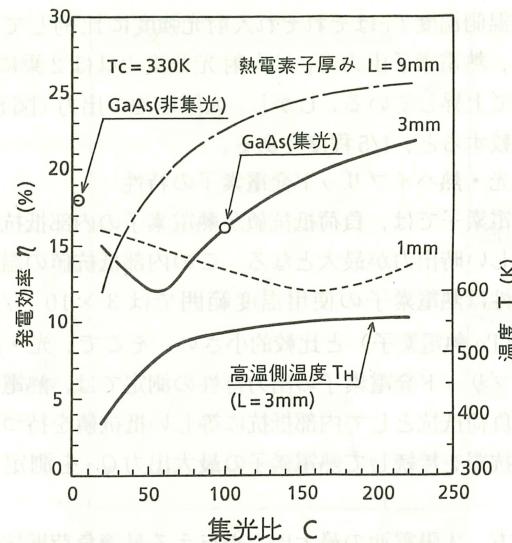


図10 発電効率の集光比依存性(計算値)
(GaAs 太陽電池/a-FeSi 熱電素子)

してフイン効率を高めた場合 1 mm, そうでない場合 1.5 mm とした。同表より、ハイブリッド発電アレイの比重試算として 19~31 kg/kW を期待できる。この比重試算の範囲は、平板型の Si 又は GaAs 太陽電池アレイ(17~29 kg/kW) 及びミニカセグレン集光鏡を用いた集光型 GaAs 太陽電池アレイの比重試算⁴⁾(17~34 kg/kW) と同程度であり、図10に示したような 20% 以上の発電効率を達成できれば、比重試算をさらに小さくできる。

7. 結論

- (1) GaAs 太陽電池と BiTe 熱電素子を組合せた光・熱ハイブリッド発電素子の特性を試験し、GaAs 太陽電池単独時に比較して効率を向上できることを確認した。しかし、入射光強度が高い領域では、温度上昇による太陽電池の効率低下を熱電素子で補えなくなり、効率は低下する。これらの試験結果は、解析結果とはほぼ一致した。
- (2) BiTe 熱電素子に比較して一桁以上高い性能指数を期待できる a-FeSi 熱電素子などの高性能熱電素子が開発されれば、平板型及び集光型の太陽電池アレイと比較して効率が高く、比重試算の小さい宇宙用の発電アレイを実現できる可能性がある。

表1 電気出力 1 kW 当たりの重量

| 項目 | 内容 | 重量(kg) |
|-------|------------------------------------|-----------|
| フレネル鏡 | 面積: 3.6 m ² /cos45° | 14~21 |
| 太陽電池 | GaAs: 200 cm ² × 0.3 mm | 0.03 |
| 熱電素子 | a-FeSi: 200 cm ² × 3 mm | 0.4 |
| 支持枠、他 | アルミ合金等 | 5~10 |
| 合計 | | 19~31(kg) |

参考文献

- 1) S. Toyoyama, H. Kuno, K. Matsubara, H. Takaoka and T. Takagi, Thermoelectric Properties of Amorphous Mn, Cr-Doped FeSi₂ Films Prepared by ICB Technique, Proc. 8th Symp. on ISIET '84 (1984), pp.

- 293-296, Tokyo, Japan.
- 2) 松原覚衛, アモルファス熱電材料, エネルギー・資源, Vol. 8 No. 6 (1987), pp. 50~55.
- 3) G・Wサットン編, 直接エネルギー変換 (1968), pp. 157~175, 好学社, 東京.
- 4) A. A. Sorensen, Space Station Electrical Power System Technology, Proc. 19th IECEC (1984-8), pp. 458-463, San Francisco, California.

(昭和63年5月12日 原稿受理)