

# スターリングエンジンを用いた太陽熱発電システムの性能予測

PERFORMANCE ANALYSIS OF DISH SOLAR STIRLING POWER SYSTEM

土屋一雄<sup>\*1</sup>Kazuo TSUCHIYA<sup>\*1</sup>山口一平<sup>\*1</sup>Ippei YAMAGUCHI<sup>\*1</sup>内藤喜裕<sup>\*2</sup>Yoshihiro NAITO<sup>\*2</sup>百瀬豊<sup>\*2</sup>Yutaka MOMOSE<sup>\*2</sup>**Abstract**

Performance analysis for dish solar Stirling power system is proposed and applied to 25 kWe class system, which is supposed to locate at Miyako island in Okinawa. In the analysis, results of our previous study for concentrator/receiver subsystem are combined to first order adiabatic model for Stirling engine analysis. As an idea for matching between the concentrator/receiver and engine/generator subsystems, it is assumed that an engine operating condition such as working gas mean pressure, heater tube wall temperature and revolution speed is varied and controlled so that heat needed for keeping the engine operation is always equal to heat supplied from the concentrator/receiver subsystem due to intensity of direct solar insolation  $I_b$ . As a predicted result of using measured  $I_b$  at Miyako island, power output increases linearly and system efficiency approaches to constant with increase of  $I_b$ . Influence of slope error of concentrator on the system performance is relatively small under large amount of  $I_b$ . The system equipped with a concentrator with slope error of 2.5 mrad generates net power output of 24.5 kWe and reaches net system efficiency of 0.229 under  $(I_b)_{max}=803.7W/m^2$ . The prediction results also show that amount of net power output and average system efficiency during a day are 190.8kWe and 0.216 respectively.

**Key word:** Solar Power system, Stirling engine, Parabolic concentrator, Central receiver, Performance analysis, Simulation method

**1. はじめに**

太陽熱発電システムへのスターリングエンジンの応用は、外燃機関であるこのエンジンの特徴を最大限に生かす適用領域といえる。このシステムは1基当たり3~50kWeの発電能力を持ち、システム規模としては小さい部類に属するが、高いシステム効率が得られる点に特徴がある。最近の地上用システムの開発事例としてドイツのDLR<sup>(1)</sup>や我が国のアイシン精機(株)<sup>(2)</sup>のシステムがある。また米国 McDonnel Douglas Energy System社の25kWe級システムでは実測システム効率27.6%が報告されている<sup>(3)</sup>。

これまで同システムに関連した研究として、構成要素であるエンジンや集光・受熱系など、要素単体の性能予測に関するもの、数ヶ月間のシステム実証試験結果から1年あるいはそれ以上の長期間にわたるシステム性能を予測する方法等、いくつかの報告がある<sup>(4)(5)</sup>。しかし、刻々変化する日射量や太陽高度の下で、始動から定常運転、停止に至るまで、エンジン機械効率や発電機効率の回転速度依存性を考慮してシステム性能予測を行った例は見当らないように思われる。

本研究ではシステム性能の予測を行うまでの集光・受熱系とエンジン・発電機系とのマッチングやエンジン運転制御の考え方、直達日射量の実測値を用いた予測結果について報告する。

**主な記号**

$A_c$ : 集光器受光面積	$W_g$ : システム出力
$I_b$ : 直達日射量	$W_u$ : 損耗動力
$L_i$ : エンジン図示出力	$\eta_i$ : エンジン図示熱効率
$N$ : 回転速度	$\eta_g$ : 発電機効率
$P_m$ : 作動ガス平均圧	$\eta_m$ : エンジン機械効率
$Q_n$ : 集光・受熱系の有効受熱量	$\eta_{COL}$ : コレクタ効率
$Q_e$ : エンジン側要求熱量	$\eta_{SYS}$ : システム効率
$r$ : アペ-チャ開口比	$\sigma_s$ : $\pm 10^\circ$ 誤差 (添字等)
$\Delta t$ : システム運転時間	max: 最大値
$T_e$ : 膨張空間作動ガス温度	net: 正味の値
$T_c$ : 圧縮空間作動ガス温度	opt: 最適値
$T_h$ : ヒータチューブ温度	— : 一日の平均値
$T_R$ : レンジ内壁温度	$\Sigma$ : 積算値

**2. システムの基本構成と諸元**

図1に全体システムのブロック図を示す。システムは太陽光を集め、これを熱エネルギーに変換する集

\* 原稿受付 平成9年11月12日

\*1 会員、明治大学理工学部(〒214-8571 川崎市多摩区東三田1-1-1)

\*2 アイシン精機(株)(〒448-0032 刈谷市朝日町2-1)

光・受熱系、この熱によりエンジン・発電機を回して発電を行うエンジン・発電機系、太陽の追尾や太陽からの受熱量に応じてエンジン作動ガスの平均圧を変化させる制御系等から構成される。

本研究では地上用 25kWe級発電システムを想定して性能予測を行う。システムの設置場所は沖縄県、宮古島とした。

集光・受熱系の基本仕様は前報<sup>(7)</sup>と同様で、集光器は直径  $D_c = 13\text{m}$  のパラボラ反射鏡とし、その誤差として二種のスロープ誤差  $\sigma_s$  ( $2.5\text{mrad}$ ,  $5\text{mrad}$ ) を想定している。スロープ誤差  $2.5\text{mrad}$  は高出力化を意図した高性能システム、 $5.0\text{mrad}$  は集光器コストを低減させて全体として低コスト化を狙ったシステムである。また受熱器は内径  $D_R = 450\text{mm}$ 、深さ  $L_R = 300\text{mm}$  の円筒型レシーバで、アパー・チャ直径は  $D_{ap} = 45 \sim 450\text{mm}$  (アパー・チャ開口比  $r = D_{ap}/D_R = 0.1 \sim 1.0$ ) の範囲で、システムのグロスの総発電量  $\Sigma W_e$  を最大にする値を計算により求めている。この時の  $r$  を最適アパー・チャ開口比と呼び  $(r)_{opt}$  で表す。

エンジンにはムーンライト計画において三洋電機(株)により開発されたNS30S<sup>(4)</sup>とほぼ同様な仕様を与えた。表1にエンジン諸元の概要を示す。エンジンの定常運転範囲はヒータチューブ壁温  $T_h$  (=レシーバ内壁温度  $T_R$ ) =  $1073\text{K}$ 、作動ガス平均圧  $P_m = 3 \sim 15\text{ MPa}$ 、回転速度  $N = 1500\text{rpm}$  であり、一方、エンジンのアイドリング状態を  $T_h = 773\text{K}$ 、 $P_m = 3\text{ MPa}$ 、 $N = 500\text{rpm}$  とした。

### 3. 各サブシステムの特性評価

#### (1) 集光・受熱系<sup>(6)</sup> <sup>(7)</sup>

パラボラ反射鏡とキャビティレシーバを組合せたこの系全体の効率として、 $Q_n$  を有効受熱量、 $I_b$  を直達日射量、 $A_c$  を集光器受光面積として次のコレクタ効率  $\eta_{COL}$  を定義する。

$$\eta_{COL} = Q_n / (I_b \cdot A_c) \quad (1)$$

ここで  $Q_n$  は、ある広がりを持つ集光器からの太陽反射光のうち、レシーバ内に熱の形で取り込まれるエネルギー量  $Q_i$  から、レシーバ部における対流、伝導、放射による熱損失分  $Q_s$  を差し引いた値である。これらはいずれも瞬時値である。与えられた直達日射量  $I_b$ 、スロープ誤差  $\sigma_s$ 、レシーバ内壁温度  $T_R$  条件の下で、 $\eta_{COL}$ 、 $Q_n$  を最大にする最適アパー・チャ開口比  $(r)_{opt}$  が存在する<sup>(6)</sup> <sup>(7)</sup>。計算によれば、 $(r)_{opt}$  は  $I_b$ 、 $\sigma_s$  により変化し、 $I_b$ 、 $\sigma_s$  が増すと大きな値をとり、 $I_b$ 、 $\sigma_s$  が減少すると小さな値になる。 $\eta_{COL}$ 、 $Q_n$  は  $I_b$  と共に増加し、 $T_R$  が大きくなると低下する傾向がある。また、 $\sigma_s$  が小さい方が大きな  $\eta_{COL}$ 、 $Q_n$  が得られる。

#### (2) エンジン・発電機系

エンジンの性能シミュレーションには、断熱解析モデルを基本とした 1st order 法を使用し<sup>(4)</sup>、エンジン図示出力  $L_i$ 、図示熱効率  $\eta_i$  は断熱解析の結果  $(L_i)_a$ 、 $(\eta_i)_a$  に経験定数 0.7 をそれぞれ乗じて  $L_i = 0.7 \times (L_i)_a$ 、 $\eta_i = 0.7 \times (\eta_i)_a$  として算出する。その際、エンジンヒータチューブ内の高温側作動ガス温度  $T_e$  はレシーバ内壁温度  $T_R$  よりも 80K 低く、またクーラチューブ内の低温側作動ガス温度  $T_c$  は  $323\text{K}$  で一定として取り扱う。種々の温度、圧力、回転速度条件下での計算結果の一例を図 2、3、4 に示す。ここで  $Q_e$  は与えられた各条件の下でエンジンを運転するために必要なエンジン側の要求熱量を表す。

① 高温側温度条件を  $T_R = 1073\text{K}$  一定のもとで、作動ガ

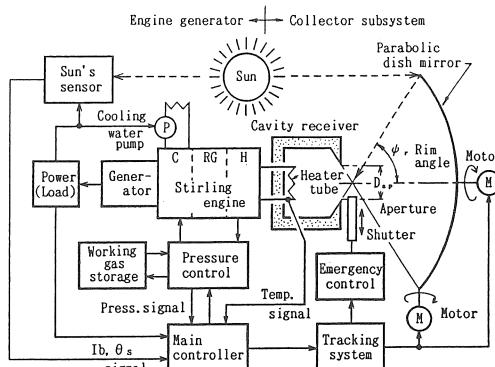


図 1 太陽熱発電システムのブロック図

表1 エンジンの基本仕様

形 式	4シリンダ・ダブルアクティング
駆動方式	ピストン・クランク駆動
作動ガス	ヘリウム
膨張、圧縮空間掃気容積	$4 \times 145\text{ cm}^3$
膨張空間温度 $T_e$	$773 \sim 1023\text{ K}$
圧縮空間温度 $T_c$	$323\text{ K}$
作動ガス平均圧 $P_m$	$3 \sim 15\text{ MPa}$
エンジン回転速度 $N$	$500 \sim 1500\text{ rpm}$
クランク位相角	$90\text{ deg}$
圧縮比	1.52
膨張側ピストン径	$68.0\text{ mm}$
圧縮側ピストン径	$68.0\text{ mm}$
膨張、圧縮側コンロッド長さ	$115\text{ mm}$
クランク半径	$20.0\text{ mm}$
膨張空間死容積	$14.5\text{ cm}^3$
圧縮空間死容積	$14.5\text{ cm}^3$
ヒータ容積	$58.1\text{ cm}^3$
クーラ容積	$31.6\text{ cm}^3$
再生器容積	$167\text{ cm}^3$
再生器空隙率	68 %

ス平均圧  $P_m$  を  $3 \text{ MPa} \leq P_m \leq 15 \text{ MPa}$  の範囲で変化させた場合(図2), 次式のようにエンジン側要求熱量  $Q_e$  (kW) は平均圧  $P_m$  (MPa) に正比例し、図示熱効率  $\eta_i$  は一定値となる。

$$\left. \begin{aligned} Q_e &= 7.79 \times P_m \\ \eta_i &= 0.438 \quad (\text{一定値}) \end{aligned} \right\} (2)$$

②作動ガス平均圧  $P_m = 3 \text{ MPa}$  一定の下でレバ内壁温度  $T_R$  を変化させた場合、図3に示すように  $Q_e$ ,  $L_i$ ,  $\eta_i$  は  $T_R$  の増加に対し、ゆるやかに増大する右上がりの曲線となる。後述する全体システムの性能予測に際しては、同図の関係をスプライン関数(3次の多項式)に近似して用いた。各係数を表2に示す。

③作動ガス平均圧を  $P_m = 3 \text{ MPa}$ , レバ内壁温度  $T_R = 773 \text{ K}$  一定の条件でエンジン回転速度  $N(\text{rpm})$  を変えた場合(図4), 以下の結果が得られる。 $Q_e$  (kW) は  $500 \text{ rpm} \leq N \leq 1500 \text{ rpm}$  の範囲で  $N(\text{rpm})$  と比例関係にあり、また  $\eta_i$  は一定値となる。

$$\left. \begin{aligned} Q_e &= 1.34 \times 10^{-2} N - 9.54 \times 10^{-7} \\ \eta_i &= 0.345 \quad (\text{一定値}) \end{aligned} \right\} (3)$$

実際のエンジン・発電機系では、エンジン回転速度の変化に伴いエンジン機械効率  $\eta_m$ , 発電機効率  $\eta_g$  も変化する。本研究では、図5に示すこれまでの報告データ<sup>(4)(8)</sup>に基づいて、これらの回転速度依存性を、Nの単位をrpmとして次式で近似する。

$$\left. \begin{aligned} \eta_m &= 1 - 6.59 N^2 / (65900 N - 167) \\ \eta_g &= 0.350 \{ \sin \pi (N - 500) / 2000 \}^{1/6} + 0.500 \end{aligned} \right\} (4)$$

#### 4. システム運転制御の考え方

本研究では、刻々と変化する集光・受熱系での有効受熱量  $Q_n$  に対して、エンジン側要求熱量  $Q_e$  が常に等し

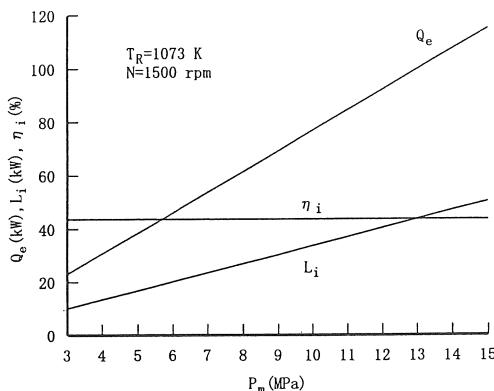


図2 作動ガス平均圧  $P_m$  によるエンジン性能の変化

くなるよう、エンジン側の運転条件をマッチングさせることでシステム性能を予測する。エンジンは  $Q_n$  の大きさに応じて図6のフローチャートに従って、以下に述べる平均圧制御、温度制御、回転速度制御されて運転、始動・停止されるものと考える。

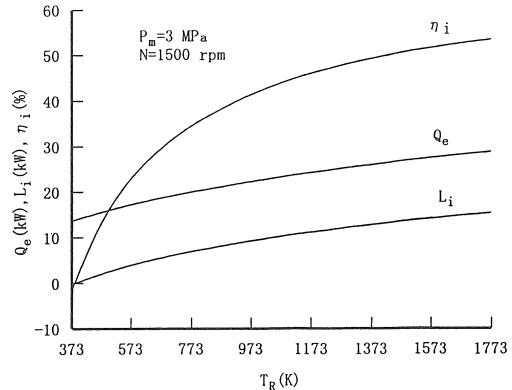


図3 レシーバ内壁温度  $T_R$  によるエンジン性能の変化

表2 スプライン関数の係数

	係数	673 < T_R < 773	773 < T_R < 873	873 < T_R < 973	973 < T_R < 1073	1073 < T_R < 1173
$L_i$	$a_3 \times 10^{-9}$	9.94	4.73	4.14	1.85	2.26
	$a_2 \times 10^{-5}$	-3.09	-1.88	-1.72	-1.04	-1.16
	$a_1 \times 10^{-2}$	4.30	3.36	3.22	2.55	2.66
	$a_0 \times 10^{-9}$	-12.4	-9.99	-9.58	-7.36	-7.71
$Q_e$	$b_3 \times 10^{-9}$	4.44	1.87	2.01	1.03	1.07
	$b_2 \times 10^{-5}$	-14.5	-8.51	-8.88	-5.94	-6.01
	$b_1 \times 10^{-2}$	2.33	1.86	1.89	1.60	1.61
	$b_0 \times 10^{-9}$	2.65	3.85	3.76	4.72	4.74
$\eta_i$	$c_3 \times 10^{-9}$	13.8	4.17	4.08	1.28	1.41
	$c_2 \times 10^{-5}$	-37.3	-14.9	-14.7	-6.34	-6.57
	$c_1 \times 10^{-2}$	3.72	1.99	1.97	1.14	1.14
	$c_0 \times 10^{-9}$	-9.40	-4.93	-4.87	-2.13	-2.07

$$\text{関数形: } L_i = \sum_{j=0}^3 a_j T_R^j, \quad Q_e = \sum_{j=0}^3 b_j T_R^j, \quad \eta_i = \sum_{j=0}^3 c_j T_R^j$$

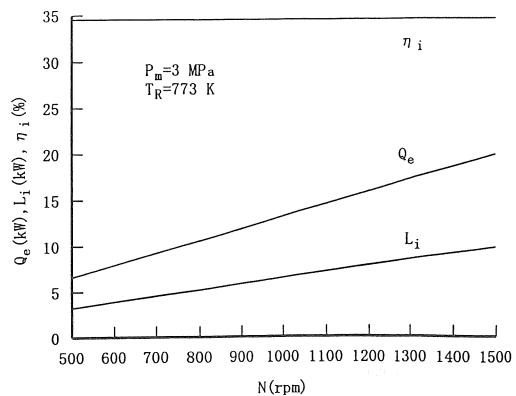


図4 エンジン回転速度  $N$  によるエンジン性能の変化

## (1) 平均圧制御運転

一般にスターリングエンジンは、負荷変動に対して、ヒータチューブ壁温 $T_h (=T_R)$ を耐熱限界以下の一定温度で保つよう平均圧 $P_m$ を制御しながら運転される。熱源を太陽熱とした場合には、有効受熱量 $Q_n$ の変化に対し、エンジン側要求熱量 $Q_c$ が常に $Q_n$ に等しくなるように、式(2)に従って作動ガス平均圧 $P_m$ を変えることで定常運転状態を維持する形になる。これは $I_b$ が十分にあり、 $Q_n$ が $T_R=1073K$ 、 $P_m=3MPa$ 、 $N=1500rpm$ の運転に必要な $Q_c$ よりも大きい時のエンジン定常運転時の制御の方式である。

## (2) 温度制御運転

一方、直達日射量 $I_b$ が低下して有効受熱量 $Q_n$ が減少し、定常運転の維持が困難になったとき、エンジンは $P_m=3MPa$ 、 $N=1500rpm$ の下でレシーバ内壁温度 $T_R$ を下げて $Q_n$ の減少に応答すると考える。これを温度制御運転と呼ぶ。前掲の図3において、 $Q_c=Q_n$ となる $T_R$ がこの時のレシーバ内壁温度である。温度制御運転は定常からアイドリングの温度条件まで $T_R=1073\sim773K$ の範囲とする。

## (3) 回転速度制御運転

さらに直達日射量 $I_b$ が低下し有効受熱量 $Q_n$ が減少した場合、 $P_m=3MPa$ 、 $T_R=773K$ の下で、エンジンは回転速度 $N=1500rpm$ からアイドリング回転速度 $N=500rpm$ の間で $N$ を低下させて $Q_n$ とバランスする運転状態に入る。これを回転速度制御運転と呼び、この時の $N$ は式(3)により計算する。

## (4) 始動・停止

エンジンは、有効受熱量 $Q_n$ がアイドリング状態( $P_m=3MPa$ 、 $T_R=773K$ 、 $N=500rpm$ )の維持に必要なエンジン側の要求熱量( $Q_c$ )よりも小さくなった( $Q_c < Q_n$ )の状態で停止し、逆に( $Q_c > Q_n$ )の条件で始動する。なお、始動時には容量2.4kWeのスタートモータで、10sec間のモタリングが要求された。

前掲、図1の全体システムを運転制御するためには、上述のスタートモータの他に、追尾装置のセンサやモータ類、エンジン冷却水の循環ポンプ、冷却ファン、システムコントローラ等の補機類が必要となる。ここでは、これらの駆動用に1kWeの電力が定常的に消費されるものと仮定する。

システム出力 $W_g$ 、およびその正味の値 $(W_g)_{net}$ は、直達日射量 $I_b$ 、集光器受光面積 $A_c$ 、コレクタ効率 $\eta_{COL}$ 、エンジンの図示熱効率と機械効率 $\eta_i$ 、 $\eta_m$ 、発電機効率 $\eta_g$ 、補機動力 $W_a$ より次式から算出する。

$$\begin{aligned} W_g &= I_b \cdot A_c \cdot \eta_{COL} \cdot \eta_i \cdot \eta_m \cdot \eta_g = Q_n \cdot \eta_i \cdot \eta_m \cdot \eta_g \\ (W_g)_{net} &= W_g - W_a \end{aligned} \quad \{5\}$$

グロスおよび正味のシステム効率 $\eta_{sys}$ 、 $(\eta_{sys})_{net}$ は、上述の $W_g$ 、 $(W_g)_{net}$ から次式によって求める。

$$\begin{aligned} \eta_{sys} &= W_g / (I_b \cdot A_c) = \eta_{COL} \cdot \eta_i \cdot \eta_m \cdot \eta_g \\ (\eta_{sys})_{net} &= (W_g)_{net} / (I_b \cdot A_c) \end{aligned} \quad \{6\}$$

一日の総発電量 $\Sigma W_g$ とその正味の値 $\Sigma (W_g)_{net}$ は、システム運転時間内で式(5)の $W_g$ 、 $(W_g)_{net}$ を積算することにより、また一日の平均的なグロス、正味のシステム効率 $\bar{\eta}_{sys}$ 、 $\{\eta_{sys}\}_{net}$ は、式(5)、(6)における瞬時値 $W_g$ 、 $W_a$ 、 $I_b$ に変え、これらの積算値 $\Sigma W_g$ 、 $\Sigma W_a$ 、 $\Sigma I_b$ を同式に代入することからそれぞれ求めることができる。

なお、集光・受熱系における有効受熱量 $Q_n$ の変化に伴う過渡運転時には、厳密にはシステムの時定数を考慮した性能予測が必要となるが、実測によりその値は非常に小さいことが報告されているので<sup>(1)</sup>、ここではそれを無視した。

## 5. 性能予測結果

## (1) 日射変動を与えた場合の性能予測結果

宮古島で実測された直達日射量 $I_b$ を用いた性能予

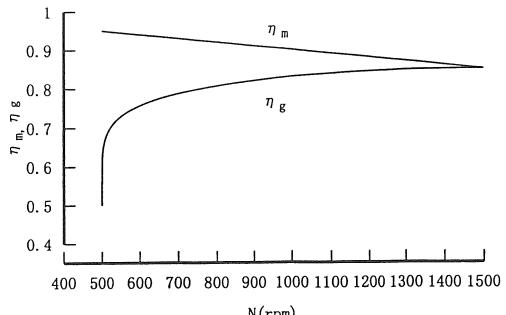
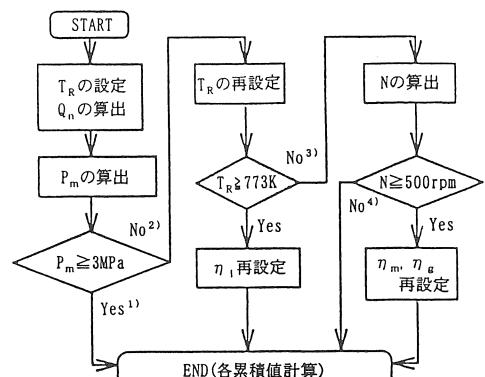


図5 エンジン機械効率 $\eta_m$ 、発電機効率 $\eta_g$ の回転速度依存性



<sup>1)</sup> 平均圧制御 <sup>2)</sup> 温度制御 <sup>3)</sup> 回転速度制御 <sup>4)</sup> エンジン停止

図6 システム運転のフローチャート

測結果の一例を図7~9に示す。

図7は雲あるが快晴に近い日射条件としては良好な場合、図8は午前中晴天、午後から雲が現れ、直達日射量の最大値は図7よりも若干低い場合、図9は時々晴れ間が現れる程度で日射条件の非常に悪い場合である。集光器のスロープ誤差は何れも  $\sigma_s = 2.5 \text{ mrad}$  としてあるが、比較の意味でシステム出力  $W_g$  についてのみ  $\sigma_s = 5.0 \text{ mrad}$  の結果も破線で示してある。またアーチャ開口比は何れの場合も最適値 ( $r_f^*$ ) である。

図7, 8の場合、有効受熱量  $Q_n$ 、システム出力  $W_g$ 、作動ガス平均圧  $P_m$  は  $I_b$  と同様な変化を示し、また回転速度  $N$  の計算結果より、システムは一日の運転時間を通してほぼ圧力制御された定常運転状態にあることが分かる。スロープ誤差  $\sigma_s$  による  $W_g$  の差は、最大で約3.5kWeである。

一方、日射条件の悪い図9の場合、 $I_b$  による  $Q_n$ 、 $W_g$ 、 $P_m$  の変化は図7, 8と同様な傾向を示すものの、エンジンは温度制御、回転速度制御、始動・停止を繰り返して運転されていることが分かる。また  $\sigma_s$  による  $W_g$  の差は、日射条件の良い図7, 8の場合よりも増大して最大で約6.8kWeとなる。

## (2) システム性能

異なる直達日射条件の下でのシステム性能を予測する意味で、直達日射量  $I_b$  に対してシステム出力  $W_g$  および効率  $\eta_{sys}$  をプロットすると図10(スロープ誤差  $\sigma_s = 2.5 \text{ mrad}$ )、図11( $\sigma_s = 5.0 \text{ mrad}$ )が得られる。エンジンの定常運転が維持可能な晴天日の場合、 $W_g$  は  $I_b$  と共に直線的に増加し、 $\eta_{sys}$  は一定値に近づく傾向がある。

図10の  $\sigma_s = 2.5 \text{ mrad}$  の場合、 $I_b > 793 \text{ W/m}^2$  で目標のシステム出力  $W_g = 25 \text{ kWe}$  が達成され、 $\eta_{sys}$  は  $I_b > 283 \text{ W/m}^2$  で20%を越すことが分かる。また同図から、 $I_b = 1000 \text{ W/m}^2$  の直達日射条件の下でのシステム性能を外挿して予測すると  $W_g = 32.0 \text{ kWe}$ 、 $\eta_{sys} = 23.9\%$  が得られる。

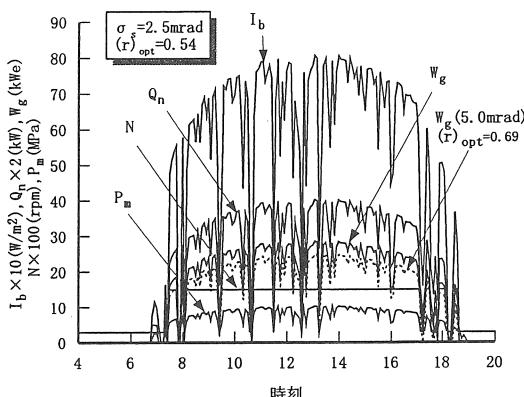


図7 性能予測結果の一例 (1995年7月28日)

他方、 $\sigma_s = 5.0 \text{ mrad}$  の図11の場合には、 $I_b > 892 \text{ W/m}^2$  で目標のシステム出力  $W_g = 25 \text{ kWe}$  が達成され、 $\eta_{sys}$  は  $I_b > 715 \text{ W/m}^2$  で20%を越し、 $I_b = 1000 \text{ W/m}^2$  の日射条件の下での予測性能は  $W_g = 28.6 \text{ kWe}$ 、 $\eta_{sys} = 21.2\%$  となる。

これらは何れもドイツ DLRシステムの実測値<sup>(1)</sup>と同傾向を示すことから、本性能予測手法の妥当性が確

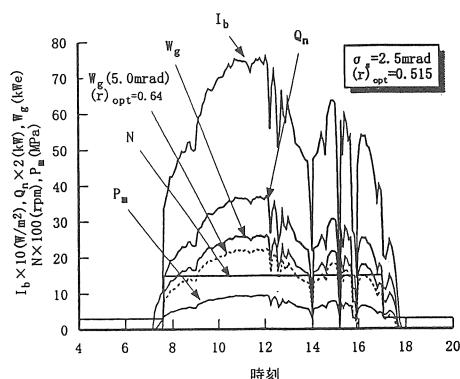


図8 性能予測結果の一例 (1995年10月24日)

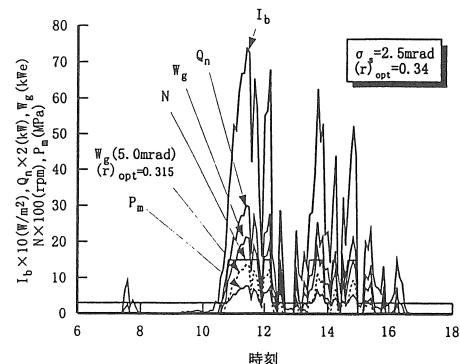


図9 性能予測結果の一例 (1995年11月9日)

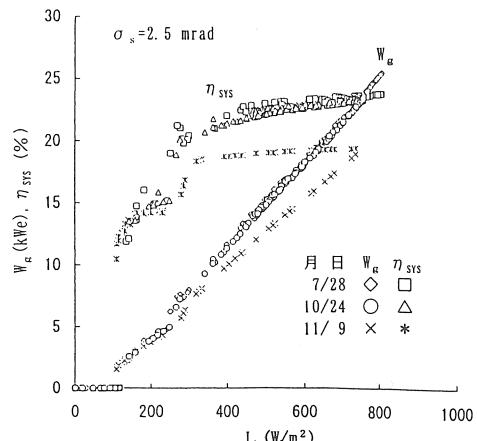


図10 システム性能(スロープ誤差  $\sigma_s = 2.5 \text{ mrad}$ )

認できる。

なお日射条件の悪い11月9日の $I_b$ と $W_g$ ,  $\eta_{sys}$ との関係が晴天日の傾向とは異なってくる理由として、エンジンが図示熱効率 $\eta_i$ の低い温度制御、回転速度制御運転される頻度が高いこと、並びに集光・受熱系において、最適アーチャ開口比( $r_{opt}$ )が $I_b$ の大きな時に比べて小さな値となっているため、同一 $I_b$ に対して有効受熱量 $Q_n$ が少ないことが考えられる。

### (3) システム各部の効率

前掲図7における最大直達日射量 $(I_b)_{max} = 804 \text{ W/m}^2$ の条件下でのシステム各部の効率を、図12(スロープ誤差 $\sigma_s = 2.5 \text{ mrad}$ )、図13( $\sigma_s = 5.0 \text{ mrad}$ )に示す。

図12の $\sigma_s = 2.5 \text{ mrad}$ の場合、コレクタ効率 $\eta_{col}$ は集光器とレシーバの各効率の積として $\eta_{col} = 0.796 \times$

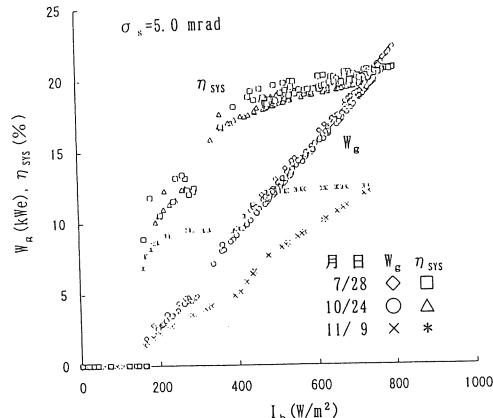


図11 システム性能(スロープ誤差 $\sigma_s = 5.0 \text{ mrad}$ )

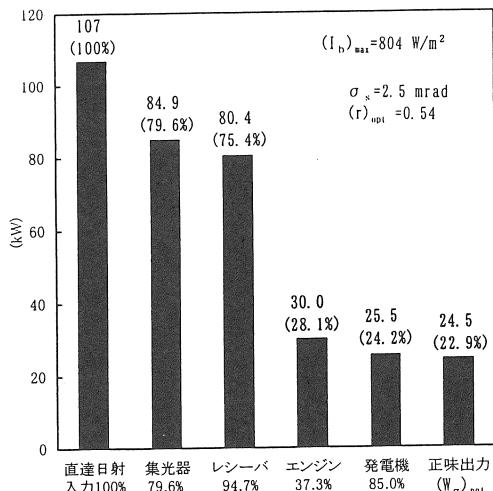


図12 システム各部の効率  
(スロープ誤差 $\sigma_s = 2.5 \text{ mrad}$ )

$0.947 = 0.754$ 、エンジン・発電機系の効率は $\eta_i \times \eta_m \times \eta_e = 0.373 \times 0.85 = 0.317$ 、正味のシステム効率と出力はそれぞれ $(\eta_{sys})_{net} = 0.229$ ,  $(W_g)_{net} = 24.5 \text{ kW}e$ となる。

一方、 $\sigma_s = 5.0 \text{ mrad}$ の図13の場合、スロープ誤差が大きい分だけ集光器の効率は低下し、またレシーバアーチャ部での太陽像直径の増加により最適アーチャ開口比( $r_{opt}$ )が大きな値となるため、レシーバ効率も低下している。結果として $\eta_{col} = 0.729 \times 0.910 = 0.657$ 、正味のシステム効率と出力はそれぞれ $(\eta_{sys})_{net} = 0.199$ ,  $(W_g)_{net} = 21.2 \text{ kW}e$ となる。

### (4) 正味総発電量と平均システム効率

一日の正味総発電量 $\Sigma \{W_g\}_{net}$ と一日の平均システム効率 $\{\bar{\eta}_{sys}\}_{net}$ の計算結果を表3に示す。ここで $\Sigma I_b$ は $I_b$ の積算値を表す。

$\{\bar{\eta}_{sys}\}_{net}$ におよぼすスロープ誤差 $\sigma_s$ の影響として、 $\Sigma I_b$ が少ない11月9日の場合、 $\sigma_s = 2.5 \text{ mrad}$ と $5.0 \text{ mrad}$ との差は約7%である。しかし、晴天で十分な直達日

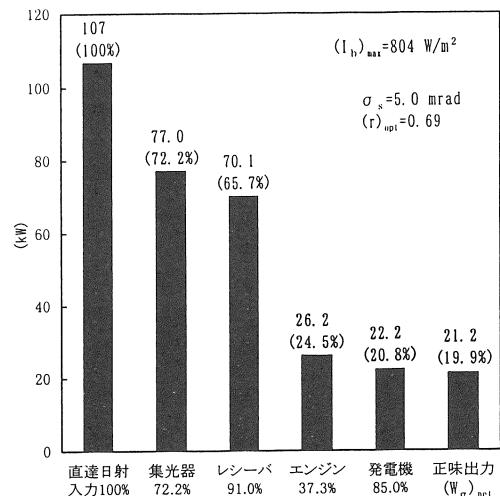


図13 システム各部の効率  
(スロープ誤差 $\sigma_s = 5.0 \text{ mrad}$ )

表3 一日の正味総発電量 $\Sigma \{W_g\}_{net}$ と平均システム効率 $\{\bar{\eta}_{sys}\}_{net}$ に及ぼす日射条件、スロープ誤差の影響

月 日	$(I_b)_{max}$ ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	$\Sigma I_b$ ( $\text{kWh}/\text{m}^2$ )	$\sigma_s$ (mrad)	$\Sigma \{W_g\}_{net}$ ( $\text{kWeh}$ )	$\{\bar{\eta}_{sys}\}_{net}$
7/28	804	6.66	2.5	191	0.216
			5.0	161	0.182
10/24	756	5.48	2.5	152	0.209
			5.0	125	0.172
11/ 9	736	1.62	2.5	26.4	0.123
			5.0	11.4	0.053

射が得られた7月28日、10月24日両日の $\Sigma I_b > 5.48 \text{ kWh/m}^2$ の条件では、 $\langle \overline{I_b} \rangle_{\text{net}}$ における両者の差は3%程度で小さい。これから、直達日射が十分に確保できる地域をシステムの設置場所に選べば、スロープ誤差の多少大きな低コスト集光器を採用しても、高精度集光器を用いたシステムとほぼ同程度の性能が達成できることが予測できる。システム設計に際して留意すべき事柄と言える。

#### (5) 最適アーチャ開口比の近似計算法

ここで集光・受熱系の最適アーチャ開口比 $\langle r \rangle_{\text{opt}}$ の算出法について若干の検討を加えておく。前掲の性能予測結果において用いた $\langle r \rangle_{\text{opt}}$ は、直達日射量 $I_b$ の変化に対して総発電量 $\Sigma W_g$ が最大になる $r$ の値として繰り返し計算を行って求めたものである。この方法によつても、データ量が少ない場合には特に不都合は生じない。しかし一年間の日射データから、年間を通しての $\langle r \rangle_{\text{opt}}$ を求めるような多量のデータを扱う際には、計算量・計算時間の低減が望まれる。比較的単純な計算から $\langle r \rangle_{\text{opt}}$ の近似値が求めれば、計算時間の短縮が期待できることになる。

図14は、 $\langle r \rangle_{\text{opt}}$ とシステム運転時間 $\Delta t$ 間の平均直達日射量 $\langle I_b \rangle_{\text{ave}} = \Sigma I_b / \Delta t$ に対する最適値 $\langle \overline{r} \rangle_{\text{opt}}$ との関係を示したものである。 $\langle r \rangle_{\text{opt}}$ の計算に際しては太陽高度 $\theta_s = 45^\circ$ 一定としてある。同図から $\langle r \rangle_{\text{opt}}$ と $\langle \overline{r} \rangle_{\text{opt}}$ とはほぼ $1 : 1$ に対応していることが分かる。このことは、繰り返し計算を行う際の $\langle r \rangle_{\text{opt}}$ の第一近似値として $\langle \overline{r} \rangle_{\text{opt}}$ が使用可能であることを意味する。年間を通しての性能予測や、システムの最適化計算を行う際には、有効な方法と思われる。

## 6. まとめ

本研究では、スターリングエンジンを用いた太陽熱発電システムについて、性能予測を行うまでの集光・受熱系とエンジン・発電機系とのマッチングや直達日射量の変動に対するエンジンの運転制御の考え方につ

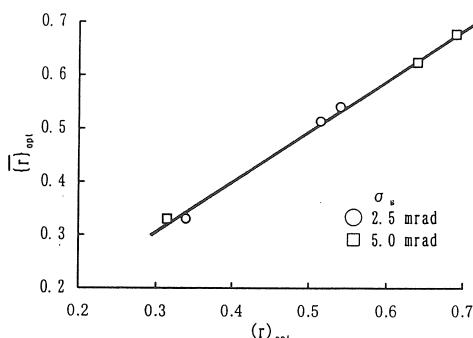


図14 最適アーチャ開口比

いて検討を加え、沖縄県宮古島での実測直達日射量により、25kWe級太陽熱発電システムの性能予測を行った。その結果、以下の事柄が明らかになった。

(1) 本シミュレーション結果は、ドイツ DLRシステムの実測値<sup>11)</sup>と同様な傾向を示すことから、本性能予測法の妥当性が確認できた。システム出力 $W_g$ は直達日射量 $I_b$ にはほぼ比例し、またシステム効率 $\eta_{\text{sys}}$ は $I_b$ の増加と共に一定値に近づく傾向がある。

(2) システム効率におよぼすスロープ誤差の影響は、積算日射量 $\Sigma I_b$ が大きい場合には比較的小さい。

(3) システム運転時間中の平均直達日射量 $\langle I_b \rangle_{\text{ave}}$ に対して求めた最適アーチャ開口比 $\langle \overline{r} \rangle_{\text{opt}}$ は、日射変動のある実際の場合の最適値 $\langle r \rangle_{\text{opt}}$ の第一近似値を与える。

終わりに本研究の一部は、日本機械学会RC127研究分科会の活動の一環として行ったものである。ここに関係各位に謝意を表す。

## 「参考文献」

- (1) A. Baumuller, R. Kohne, W. Schiel, U. Sprengel, "Solar Stirling Power R+D-Activities in Germany", Proc. ICSC-95 IP02, 1995.
- (2) 内藤、上西園, "太陽熱利用スターリングエンジン発電システムの開発", 日本機械学会、全国大会講演論文集, 1995.
- (3) G. C. Coleman, J. E. Raetz, "Field Performance of Dish/Stirling Solar Electric Systems", 21st IECEC, No. 869136, 1986.
- (4) 日本機械学会, "RC110 研究分科会成果報告書", 1994.
- (5) W. B. Stine, "Experimentally Validated Long-Term Energy Production Prediction Model for Solar /Stirling Electric Generating Systems", 30th IECEC, No. RE-16, 1995.
- (6) 土屋、藤井, "太陽熱利用システムにおける集光・受熱系の性能予測", 太陽エネルギー, Vol. 19, No. 4, 1993.
- (7) 土屋、桑原、藤井, "太陽熱利用システムにおける集光・受熱系の性能予測(日射パターンを考慮した場合)", 太陽エネルギー学会講演論文集, 1995.
- (8) 徳納, "高効率発電機(Tokuno dynamo)", 鷹羽化学工業(株)