

# プロトタイプ太陽光・風力ハイブリッド発電システムの フィールドテストとシミュレーション

Fieldtest and Simulation  
of Prototype Photovoltaic/Wind Hybrid Generating System

古家秀彦<sup>\*1</sup>  
Hidehiko FURUYA

斎藤満孝<sup>\*1</sup>  
Mitsutaka SAITOU

土屋幸男<sup>\*1</sup>  
Yukio TSUCHIYA

榎原建樹<sup>\*1</sup>  
Tateki SAKAKIBARA

## Abstract

A prototype photovoltaic/wind hybrid generating system is constructed and the fieldtest is carried out for 21 days. Output characteristics of the photovoltaic (80 Wp) and the wind generator (150 Wp), and charge/discharge characteristics of a storage battery (170 Ah) are measured and then they are approximated by formulas. Computer simulations are executed using the formulas and the weather data, and a given electrical load pattern. The simulation results agree well with the fieldtest results.

The effect of the sampling or computing interval  $\Delta t$  on the simulation results is examined for the  $\Delta t$  ranging from 5 to 120 min. It is concluded that the  $\Delta t$  of less than 40 min is appropriate for the computer simulations.

**Key Words:** Photovoltaic/wind hybrid generating system, Charge/discharge characteristics of a storage battery, Modeling, Fieldtest, Simulation, Computing interval

## 1. はじめに

代表的な自然エネルギー利用発電である太陽光発電と風力発電との間には、日本の特に太平洋側では夏季に強く冬季に弱い太陽光、冬季に強く夏季に弱い風力といった季節的な相補性が存在し、両者を併用した発電システムでは年間を通じて安定したエネルギーを得ることができ、さらには電力貯蔵設備の縮小化が期待できる<sup>(1)(2)</sup>。

これまで、太陽光・風力ハイブリッド発電システムに関する運用法およびシミュレーションに関する研究は種々行われており、その有効性が唱えられている<sup>(3)</sup><sup>(4)</sup>。しかし、システム構成およびフィールドテストに関する研究は少なく、シミュレーション結果の妥当性

原稿受付 平成4年11月16日

が十分検討されていない。そこで本研究では、プロトタイプの太陽光・風力ハイブリッド発電システムを試作し、21日間にわたってフィールドテストを実施し、その出力特性を計測する。一方、システムの構成要素である太陽電池、風力発電機および蓄電池に関し、特性式を作成し、フィールドテストの運用にのっとってシミュレーションを実行し、その結果とフィールドテストの結果とを比較する。また、サンプリング間隔を変えてシミュレーションを行い、シミュレーション結果に与えるサンプリング間隔の影響を調べる。

## 2. システムの構成

図1に今回試作した太陽光・風力ハイブリッド発電システムの構成を示す。太陽電池、風力発電機および補助発電機はそれぞれ逆流防止用ダイオードを介して、

\*1 豊橋技術科学大学工学部

蓄電池に接続されている。太陽電池および風力発電機の最大出力は80W, 150Wである。蓄電池は自動車用12V 170Ahの鉛蓄電池を2個直列に接続することにより、24V 170Ahとして使用した。電子負荷をパソコンで制御することにより任意の日間負荷曲線が得られるようにした。また、蓄電池の過充電を防止するため、ダミー負荷を白熱電球で構成し、余剰電力を消費させた。補助発電機およびダミー負荷のスイッチS<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>のオン・オフは蓄電池の充電率に因った。すなわち補助発電機に関しては、充電率が20%に低下したときにオン、60%に上昇したときにオフとなるようにした。ダミー負荷に関しては、充電率が100%に達したときにオン、100%以下に低下したときにオフとなるようにした。

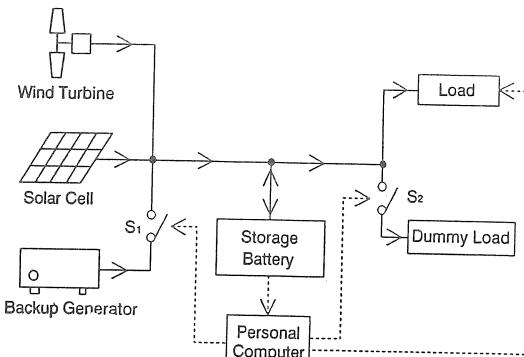


図1 プロトタイプ太陽光・風力ハイブリッド発電システムの構成

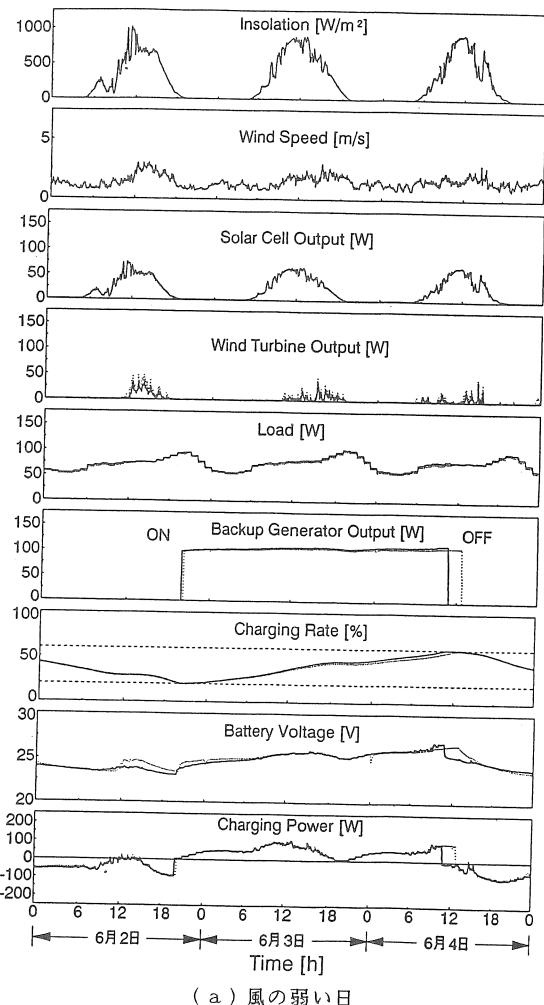
### 3. フィールドテスト

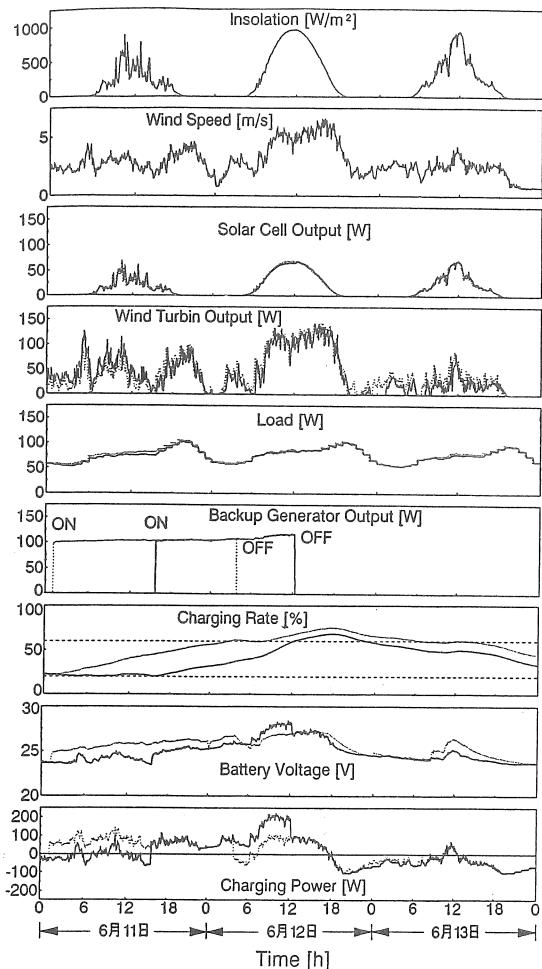
一般的な日間負荷曲線は24時間中にピークおよびオフピークを持つ。今回、フィールドテストで採用した日間負荷曲線の形状は、離島でのシステム導入を想定し、伊勢湾に浮かぶ「神島」の1990年の年間平均日負荷曲線とした。神島（人口：726人）の主要産業は漁業および観光で、電力供給は全てディーゼル発電機（総出力：675kVA）で賄われている。なお、日間負荷曲線を積分した1日の消費電力量としては、本システムの予想発電量を勘案し、1730Whとした。

フィールドテストは1992年5月27日～6月16日の21日間にわたって行った。日射量、風速、太陽電池の電圧・電流など12種類のデータをパソコンを用いた自動計測システムにより収集した。サンプリング間隔を1秒とし、それらの5分間平均値を記録した。前節で述べたように、ダミー負荷および補助発電機のスイッチのオン・オフのタイミングは蓄電池の充電率に因って

制御するとしたが、この充電率は直接には計測できない。そこで計測された蓄電池の充・放電電流の値を用いて充電率を逐次計算した。

21日間のフィールドテストのうち、6日間の結果を図2に実線で示す。同図(a)は風速が3m/s以下の風の弱い日が続いたときの結果であり、(b)は5m/sを超える風速が吹いた比較的の風の強い日が続いたときの結果である。蓄電池充電電力は、太陽電池出力、風力発電機出力と補助発電機出力との和が負荷電力よりも大きいときに正となり、小さいときに負となっている。補助発電機は、蓄電池の充電率が20%に低下したときにオンされ、60%に上昇したときにオフされている。補助発電機がオン状態である時間間隔は、(a)の方が(b)より長くなっている。すなわち、風の弱い日が続くと補助発電機をより長く運転しなければならなくなることを示している。





(b) 風の強い日

図2 フィールドテスト(実線)とシミュレーション結果(点線)

## 4. シミュレーション

## 4. 1 供試太陽電池の出力特性

使用した太陽電池の出力と日射量との関係を計測した。サンプリング間隔 1 s のデータを 5 分間で平均した結果を図 3 にプロットで示す。実線はそれらのプロットを最小自乗法を用いて近似した 1 次式であり、次式となる。

$$P_s = 0.0721 I_s \quad (1)$$

ここで、 $P_s$  : 太陽電池出力 [W],  $I_s$  : 日射量 [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]

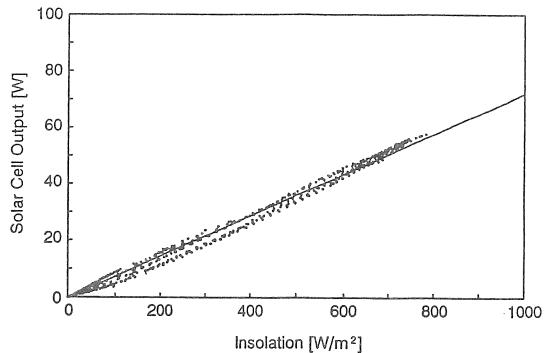


図3 供試太陽電池の出力特性

## 4. 2 供試風力発電機の出力特性

使用した風力発電機の定格出力は 150 W で、遠心可変ピッチ制御の 2 枚翼の水平軸風車である。その出力と風速との関係を計測した結果を図 4 にプロットで示す。計測結果を見ると、カットイン風速は 1.6 m/s であり、風速が約 7 m/s に達すると定格出力が得られていることがわかる。これらの計測結果を近似式で表すと次のようになる。

$$P_w = 0 \quad (v < 1.6) \quad (2)$$

$$P_w = -0.497 v^3 + 3.48 v^2 + 28.8 v - 51.4 \quad (1.6 \leq v < 7.2) \quad (3)$$

$$P_w = 151 \quad (v \geq 7.2) \quad (4)$$

ここで、 $P_w$  : 風力発電機出力 [W],  $v$  : 風速 [m/s]

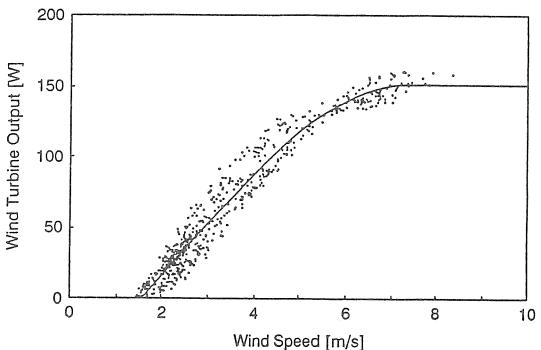


図4 供試風力発電機の出力特性

## 4. 3 供試蓄電池の電圧-充電率特性

本システムでは、風力発電機、太陽電池、補助発電機および電力負荷は、蓄電池を介して並列に接続され

ている。従って、システムの電圧は蓄電池の電圧に等しい。この蓄電池電圧は蓄電池の充・放電電流と充電率によって決まる。シミュレーションを実行するためには、それらの関係を前もって求めておく必要がある。そこで、まず、供試蓄電池の充・放電特性をなわち、充・放電電流を2.5, 5.0, 7.5, 10.0A一定とした場合の電圧-時間特性を計測した。この計測結果をもとに、蓄電池の電圧-充電率特性を求めた。その結果を図5と図6に実線で示す。

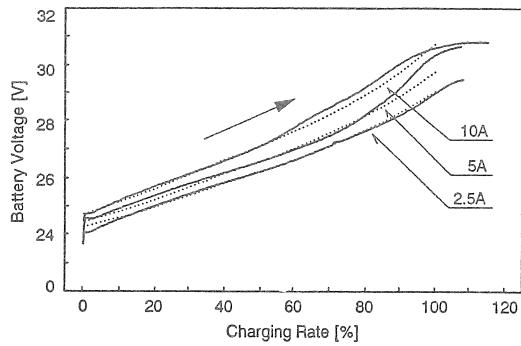


図5 供試蓄電池の充電特性  
(実線: 実測値, 点線: 近似式)

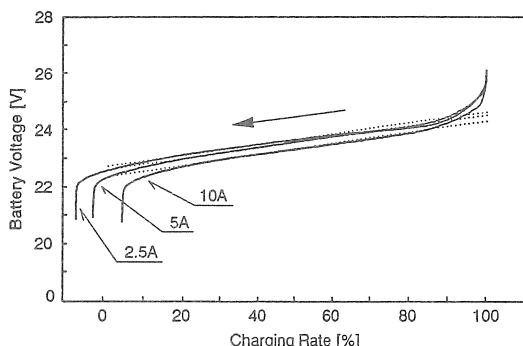


図6 供試蓄電池の放電特性  
(実線: 実測値, 点線: 近似式)

一方、蓄電池の電流-電圧特性を表す式としては、比較的よく使用されているもの<sup>(5)</sup>を採用し、それらの式中の定数は実測値と合うように決定した。その結果、次式が得られた。

充電時 :

$$I = n \{ A(D) \left( \frac{V}{m} - E_1(D) \right) \}^{z(D)} \quad (5)$$

$$A(D) = 1.429 \times 10^{-2} D + 0.857$$

$$E_1(D) = 0.45 \exp(-D/100) + 1.837$$

$$Z(D) = \alpha \exp(-\beta D) + \gamma$$

放電時 :

$$I = n \{ \frac{V}{m} - E_2(D) \} / R(D) \quad (6)$$

$$E_2(D) = 2.06 - 1.583 \times 10^{-3} D$$

$$R(D) = 1.19 \times 10^{-5} D^2 + 0.6$$

ここで、 $D$  : 放電深度、 $n$  : 蓄電池の並列数、 $m$  : 直列数

供試蓄電池は24V 170Ahであるので、 $n = 170$ ,  $m = 12$ となる。また、 $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ は放電深度の範囲に応じて表1のように与えた。

表1 供試蓄電池特性式中の定数

放電深度 [%]	0~40	40~60	60~100
定数			
$\alpha$	1.152	0	-0.723
$\beta$	0.154	0	-0.0091
$\gamma$	1.947	1.95	3.2

(5)式および(6)式を用いて、電流をパラメータに電圧-充電率特性を計算した結果を、図5および図6に点線で示す。充電率が20~90%の範囲では、実測値と計算値とはよく一致している。

蓄電池の電流-電圧特性は充電時と放電時とでは(5)式、(6)式のように異なるため、充電から放電へ、あるいは放電から充電へ移るときに電圧の変化が不連続となる。しかしながら、実際の蓄電池電圧の変化は連続的である。この点を解決するために、蓄電池の両端に、キャパシタンスを並列に接続することにした。すなわち(5)式および(6)式で与えられる蓄電池の静特性の式に、キャパシタンスの項を付加することにより、次式のように動特性の式を得た。

充電時 :

$$I(t) = n \left[ \frac{C_1}{m} \frac{dV(t)}{dt} + A(D) \left( \frac{V(t)}{m} - E_1(D) \right) \right]^{z(D)} \quad (7)$$

放電時 :

$$I(t) = n \left[ \frac{C_2}{m} \frac{dV(t)}{dt} + \left( \frac{V(t)}{m} - E_2(D) \right) / R(D) \right] \quad (8)$$

ここで、 $C_1$ ,  $C_2$ の値としては実測値と計算値とが合

うよう、 $C_1 = 1 \text{ kF}$ 、 $C_2 = 20 \text{ kF}$ とした。

供試蓄電池の充電容量は185 Ah、放電容量は170 Ahであったので、充電効率 $\eta$ は

$$\eta = \frac{170}{185} = 0.92$$

となる<sup>(6)</sup>。また、 $t=t_0$ のときの放電深度を $D_0$ （%）とすると、 $\Delta t$ （h）後の放電深度 $D(\Delta t)$ は次式で与えられる。

充電時：

$$D_1(\Delta t) = D_0 - \frac{I_1 \cdot \Delta t}{185} \times 100 \quad (9)$$

放電時：

$$D_2(\Delta t) = D_0 + \frac{I_2 \cdot \Delta t}{170} \times 100 \quad (10)$$

ここで、 $I_1$ ：充電電流、 $I_2$ ：放電電流

なお、放電深度 $D$ と充電率 $C$ とには次式の関係がある。

$$D + C = 100 \quad (11)$$

#### 4.4 シミュレーションのフローチャート

図7にシミュレーションに用いたフローチャートを示す。

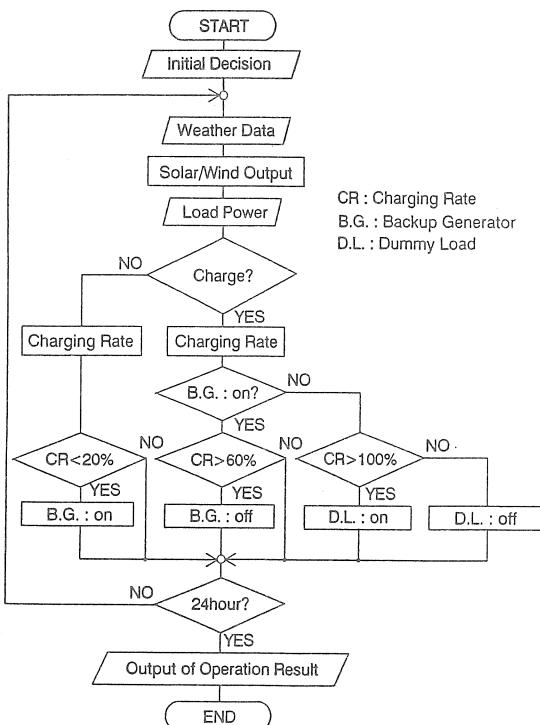


図7 シミュレーションのフローチャート

入力データは、日射量、風速および負荷電力の5分間毎の値である。太陽電池出力は(1)式を、風力発電機出力は(2)、(3)、(4)式を用いて計算する。その出力和が負荷電力よりも大きいときは、その差を蓄電池電圧で割ることにより充電電流を求め、(9)式および(11)式に代入し充電率を求める。一方、出力和が負荷電力よりも小さいときは、同様に放電電流を求め、それを(10)式および(11)式に代入し充電率を求める。この充電率の値により、補助発電機のオン・オフ、およびダミー負荷のオン・オフを制御する。この計算を288回（24時間）繰り返し、1日毎にシミュレーション結果を出力する。

#### 5. フィールドテストとシミュレーション結果との比較

21日にわたって実測した日射量、風速および日負荷パターンを入力データとして、前節で述べたシミュレーションを実行した。そのうち、6日間の結果を図2(a)、(b)に点線で示す。(a)のケースでは、フィールドテストとシミュレーション結果とはよく一致している。(b)のケースでは、特に補助発電機出力、充電率、蓄電池電圧および蓄電池充電電力に関し、フィールドテストとシミュレーション結果には一致しない時間帯（6月11日の1時～16時と6月12日の4時～12時）がある。6月11日の1時～16時の時間帯では、充電率のフィールドテスト（実線）が補助発電機のオン充電率である20%のレベルに接近しているが、なかなか20%に達せず、そのため補助発電機のオン時間がシミュレーションよりもかなり遅れる結果となっている。この影響がひきずられ、6月12日の4時～12時の時間帯におけるフィールドテストとシミュレーション結果との不一致が生じている。充電率があるレベルにとどまるのは、太陽電池・風力発電出力が負荷電力とバランスするときであり、このレベルが補助発電機のオン充電率あるいはオフ充電率のごく近傍に位置するときに、補助発電機のオン時間あるいはオフ時間に関しフィールドテストとシミュレーション結果とに時間差が生じることとなる。この改善方法として、充電率の変化の勾配を考慮を入れる運用法等が考えられる。今回は設備の関係上このような運用法でフィールドテストを実施できなかったが、今後、検討していく予定である。

21日にわたるフィールドテストとシミュレーション結果を見てみると、図2(b)のように両者が一致しない時間帯もあるが、補助発電機のオン頻度および補助発電電力量に関し、フィールドテストとシミュレー

ション結果とは全体としてはほぼ一致した。これは、図2(a)と(b)からもわかるように、フィールドテストにしろシミュレーションにしろ、補助発電機のオン時間が早ければその後のオフ時間がその分早くなり、逆にオン時間が遅ければオフ時間がその分遅れることになるからである。

本研究で実施したフィールドテストの21日間の中には、日射量・風速が共に強い日、一方が強くて他方が弱い日、両方とも弱い日など種々の気象条件があった。そのような条件下でもフィールドテストとシミュレーション結果とは比較的よく一致していた。しかしながら、両者をさらに厳密に比較するためには、寒候期を含めて通年特性をとる必要がある。

## 6. シミュレーション結果に及ぼすサンプリング間隔の影響

1年以上の長期にわたってシミュレーションを実行する場合、入力データのサンプリング間隔 $\Delta t$ が問題となる。 $\Delta t$ が短いと精度はよくなるが計算時間が長くなり、逆に $\Delta t$ が長いと計算時間は短くなるが精度がわるくなる<sup>(7)</sup>。そこで $\Delta t$ の値を変えてシミュレーションを行いシミュレーション結果に及ぼす $\Delta t$ の影響を調べてみた。その一部を図8に示す。 $\Delta t$ が長くなると、補助発電機のオンおよびオフ時間が遅れ、その影響が充電率、蓄電池電圧および蓄電池充電電力の変動に現れている。

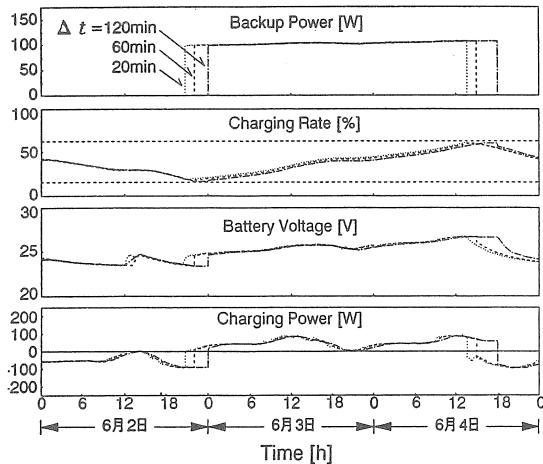


図8 種々のサンプリング間隔 $\Delta t$ でシミュレーションしたときの結果

21日間にわたって $\Delta t$ を変えてシミュレーションを実行したときの補助発電機オン・オフの遅れ時間の平

均値と標準偏差とを図9に示す。基準としたシミュレーションは $\Delta t = 5$ 分とした場合である。図9中の破線は、遅れ時間を $\Delta t_s$ とし、 $\Delta t_s = \Delta t - 5$ の直線を示し、サンプリング間隔が長くなる分遅れ時間が長くなる傾向を表している。同図から、 $\Delta t$ が長くなると $\Delta t_s$ も長くなるが、 $\Delta t$ が40分より長くなると、 $\Delta t_s$ の平均値は2倍以上になり、しかも標準偏差が大きくなる。また、 $\Delta t$ が40分以下では $\Delta t = 5$ 分の場合に比べ、補助発電機の発電量および始動頻度は、ほぼ同程度であった。従って、シミュレーションの応答に関し、サンプリング間隔の2倍程度の遅れ時間を許容してもよいとするならば、 $\Delta t \leq 40$ としてもよいと言える。

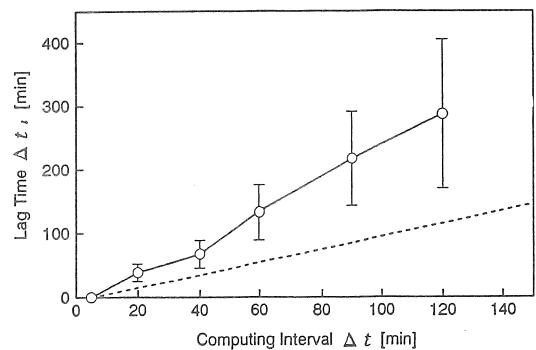


図9 補助発電機のオン・オフ時間の遅れのサンプリング間隔依存性（基準： $\Delta t = 5$  min）

## 7. まとめ

プロトタイプ太陽光・風力ハイブリッド発電システムを試作し、21日にわたってフィールドテストを実施した。次に、システムの構成要素である太陽電池、風力発電機および蓄電池に関し、それらの特性式を実測値に基づき作成し、日射量、風速および日負荷パターンを入力データとし、シミュレーションを用いて、システム動作を求めた。フィールドテストとシミュレーション結果とを比較したところ、補助発電機のオン・オフ時間に多少の違いはあるものの、蓄電池の充電率、電圧および充電電力などに関し両者は良い一致を示した。また、今回は試作したシステムの出力規模の関係上、1日の消費電力を1730Whとしてシミュレーションを行ったが、シミュレーション自体はこの規模に限定されるものではなく、シミュレーションの規模をさらに大きくして離島などへの導入の可能性が検討できる。

シミュレーションのサンプリング間隔を5分から120

分まで変化させ、サンプリング間隔がシミュレーション結果にどの程度影響を及ぼすかについて調べた。サンプリング間隔5分のシミュレーション結果を基準にし、それ以上のサンプリング間隔でシミュレーションした結果と比較したところ、サンプリング間隔が40分を超えると、補助発電機のオン・オフ時間の遅れが大きくなることがわかった。

## 文 献

- (1) 金子他、離島型電力負荷に適した太陽光・風力ハイブリッド発電システムの構成と自然エネルギー浸透、電気学会論文誌D, 112-3(1992), 270~276.
- (2) L.M.Manninen, et al., Dynamic simulation and sizing of photovoltaic and wind power systems, Photovoltaic Solar Energy Conf., (1989-9), 546~549, Finland.
- (3) 斎藤他、太陽光・風力ハイブリッド発電システムの出力特性とシミュレーション、電気学会電力技術研究会資料, 88-71 (1988), 135~144.
- (4) H.Gabler, et al., Wind-solar hybrid electrical supply system. Results from a simulation model and optimization with respect to energy pay back time, Solar Wind Technology(1988), 5-3, 239~247.
- (5) 大山他、分散型太陽光発電システムの電力系統との協調運用法、電気学会電力技術研究会資料, 85-31(1985), 109~118.
- (6) 高村他、電池と未来発電(1979), 67~69, 電子通信学会編, 東京.
- (7) 野村他、太陽光・風力ハイブリッド発電シミュレーションにおけるサンプリング間隔の影響、電気学会全国大会講演論文集, (1989), 11-145, 東京.