太陽光発電電力予測を用いた太陽光・ディーゼル ハイブリッド発電システム運用法

正員 山本 茂広* 正員 角 和芳**
非会員 西川 榮一* 正員 橋本 武***

An Operating Method Using Prediction of Photovoltaic Power for a Photovoltaic-Diesel Hybrid Power Generation System

Shigehiro Yamamoto*, Member, Kazuyoshi Sumi**, Member, Eiichi Nishikawa*, Non-member,
Takeshi Hashimoto***, Member

This paper describes a novel operating method using prediction of photovoltaic (PV) power for a photovoltaic-diesel hybrid power generation system. The system is composed of a PV array, a storage battery, a bi-directional inverter and a diesel engine generator (DG). The proposed method enables the system to save fuel consumption by using PV energy effectively, reducing charge and discharge energy of the storage battery, and avoiding low-load operation of the DG. The PV power is simply predicted from a theoretical equation of solar radiation and the observed PV energy for a constant time before the prediction. The amount of fuel consumption of the proposed method is compared with that of other methods by a simulation based on measurement data of the PV power at an actual PV generation system for one year. The simulation results indicate that the amount of fuel consumption of the proposed method is smaller than that of any other methods, and is close to that of the ideal operation of the DG.

キーワード：太陽光発電，ディーゼル発電機，蓄電池，ハイブリッドシステム，予測

Keywords: photovoltaic power generation, diesel engine generator, storage battery, hybrid system, prediction

1. はじめに

離島や商用電力系統から離れた遠隔地では、以前から自然エネルギーの導入が考えられている。著者らも、独立した電源を必要とする船舶を対象として、自然エネルギーによる発電を導入した場合の発電電力量などを検討してきた⁽¹⁾⁽²⁾。

独立型電源システムとして自然エネルギーを利用する場合、電力を安定して供給するには、蓄電池やディーゼル発電機などとハイブリッドシステムを構成する必要がある。そ

のようなハイブリッドシステムについては、これまでに数多くの研究がなされているし、実際に使用されてもいる。

例えば、Nayar らは、ディーゼル発電機と蓄電池からなるハイブリッドシステムで、低負荷時には蓄電池のみで負荷に電力を供給し、高負荷時にはディーゼル発電機を起動して出力をあるレベル以上に保ち、負荷に電力を供給すると同時に蓄電池を充電するシステムについて報告している⁽³⁾。このとき、蓄電池の充電用として風力発電機の併用も検討されている。

また、自然エネルギー・ディーゼル発電機・蓄電池のハイブリッドシステムにおいて、自然エネルギーの発電電力、蓄電池充電状態、負荷電力からディーゼル発電機の出力をファジィ推論により決定するシステムや⁽⁴⁾、ディーゼル発電機の燃料消費コストと蓄電池の交換コストを考慮して、ディーゼル発電機の起動・停止や蓄電池の充放電を決める運用方法も提案されている⁽⁵⁾。Muselli らは、ディーゼルあるいはガソリン機関発電機を蓄電池の充電のみに利用し、蓄電池を決められた最低と最高の充電状態の間で運用するシステムを提案し、発電コストなどを論じている⁽⁶⁾、Ismail らは、逆に、蓄電池の充電状態をある一定値に保つようディー

* 神戸大学 海事科学部
〒658-0022 神戸市東灘区深江南町 5-1-1
Kobe University, Faculty of Maritime Sciences
5-1-1, Fukae-minami-machi, Higashi-nada-ku, Kobe 658-0022

** 海技大学校
Marine Technical College
〒659-0026 芦屋市西蔵町 12-24
12-24, Nishi-kura-cho, Ashiya 659-0026

*** 神戸商船大学名誉教授
〒658-0022 神戸市東灘区深江南町 5-1-1
An Emeritus Professor, Kobe University of Mercantile Marine
5-1-1, Fukae-minami-machi, Higashi-nada-ku, Kobe 658-0022

ゼル発電機を制御するシステムを提案している⁽⁷⁾。

以上のように、様々なハイブリッドシステムが提案されているが、どのシステムもその時々自然エネルギーの発電電力、蓄電池充電状態、負荷電力などに基づき、ディーゼル発電機の出力や蓄電池の充放電を決定している。これに対して、その時刻以降の状態を知ることができれば、すなわち、自然エネルギーから得られる電力と負荷消費電力が予測可能であれば、従来とは異なった高効率なシステム運用法が考えられる。

自然エネルギーによる発電電力などの予測は難しいが、太陽光発電電力を予測するための基礎的研究を著者らが行っている^{(8)~(10)}、翌日の風速を予測する研究も行われており⁽¹¹⁾、研究が進むにつれて予測精度が向上しつつある。実際に、電源システムではないが、日射量予測を応用した太陽熱/深夜電力給湯システムの運用についても研究されている⁽¹²⁾。

このような予測を用いるという考え自体は、ハイブリッド電源システムを対象としても、すでに示されている。例えば、文献(13)では、太陽光・風力・ディーゼル発電機からなるシステムにおいて、風力発電機の電力量予測から風力発電機の台数制御を行うことが提案されている。しかし、提案手法では、自然エネルギーが有効に利用されているとは言い難く、また、どちらかと言えば、遠隔オンラインスケジューリングが研究目的である。このように、自然エネルギーの予測を利用した独立型ハイブリッド電源システムについては、概念的なものに留まり、具体的な運用方法や燃料消費量削減効果などについて十分に検討されていない。

そこで本論文では、自然エネルギー、特に、太陽光発電の発電電力が予測可能であるとした場合の、太陽光・ディーゼル発電機・蓄電池からなるハイブリッドシステムの新しい運用法を提案する。提案手法は、一定時間の太陽光発電電力と負荷電力の平均値の時系列データを予測してディーゼル発電機の最適な運転計画を立てることにより、太陽光発電電力の有効利用、蓄電池充放電電力量の減少、ディーゼル発電機の最適負荷率運転を実現するものである。これによりディーゼル発電機の燃料消費量を削減することができる。以下、提案手法の詳細と、1年間の太陽光発電電力の実測データに基づくシミュレーションによる検証結果を述べる。

2. システムの構成と前提条件

提案する運用方法は、図1に示すようなシステムを対象とする。システムは、負荷、太陽電池(PV)、蓄電池、双方向インバータ、および、ディーゼル発電機(DG)から構成される。図中の数字は後のシミュレーションで用いる標準的な容量である。以下、本論文で用いた各装置のモデルと前提条件について説明する。

2・1 太陽電池 太陽電池は、神戸商船大学(現神戸大学海事科学部、東経135度18分、北緯34度42分)に

図1 システムのブロック図

Fig. 1. Block diagram of system.

図2 日負荷曲線

Fig. 2. Daily load profile.

傾斜角15°で南向きに設置されている総面積82.3m²の多結晶シリコン型太陽電池をモデルとする。通常は、最大電力追従制御型のインバータを介して商用電力系統と連系されており、この発電電力の実測値を後述のシミュレーションで利用した。最大定格出力は約10kWであり、シミュレーションではこの値を標準とするが、最大定格出力をパラメータとして変化させた場合も検討する。なお、以下で太陽光発電電力(量)という場合には、その時々の日射状態で太陽光発電装置から得られる最大電力(量)を指す。

2・2 負 荷 負荷に関しては、提案手法の効果がよく現れると考えられる次の条件、(1)晴天時は太陽光発電電力が負荷電力を上回ることがあること、(2)太陽光エネルギーのみでは、全需要電力量をまかなうことができず、必ずディーゼル発電機などの他の電源が必要であることを考慮して決定した。まず、1時間毎に適当な値を定めて1日の負荷曲線(標準負荷曲線と呼ぶ)を作成した(図2の太線)。前述の最大10kWの太陽電池に対して、標準負荷曲線の最大値は4.5kW、最小値は1.5kW、平均値は約3.1kWとなっている。次に、標準負荷曲線を基に乱数を用いて±10%以内の変動を加えたものをシミュレーションで用いる負荷電力とした。図2の細線がその例である。

また、本提案方式では太陽光発電電力のみならず負荷電力の予測も必要である。負荷電力の予測に関しては、これまで数多くの研究がなされているため、その研究成果が使えるものとする。例えば、文献(14)では、翌日24時点の電力需要予測の結果として、平均予測誤差2.73%、最大予測誤差6.41%を挙げている。ただし、これは平日の晴れの日に限った結果であり、予測精度については、様々な条件に依存すると考えられることから、誤差をやや大きめに見積もった。具体的には、図2の標準負荷曲線を予測値とすることで予測誤差を±10%以内としている。

なお、現実には、負荷電力は季節などによっても大きく変動するが、その変動は様々な条件に依存するために一般化するのが困難であり、また、本提案方式では、負荷電力と太陽光発電電力の差が重要であって、一般に太陽光発電電力の方が変動が激しいことから、負荷電力を大きく変動させなくとも提案方式の効果の検証に差し支えないと考えられる。ただし、確認のため、負荷電力を図2の曲線とは全く別に、乱数のみで決定したシミュレーション結果も後に示す。

2・3 蓄電池 蓄電池については、詳細なモデル化も検討されているが⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾、ここでは、計算の簡略化のため、充電効率 η_b のみを考慮する。すなわち、太陽電池の発電電力量 E_p を一旦蓄電池に充電したのちに負荷に供給できる電力量は、 $\eta_b E_p$ である。蓄電池容量は、パラメータとして変化させて検討する。なお、本論文でいう蓄電池容量は充放電に使える実質的な容量を指すものとする。

2・4 インバータ インバータは、双方向、すなわち、通常の直交変換のほか、ディーゼル発電機の出力電力が負荷電力を上回る場合は、余剰電力を整流して蓄電池に充電できるものとする。このとき、蓄電池の充電効率を含めたインバータの効率を η_i とする。すなわち、ディーゼル発電機の発電電力量 E_d を一旦蓄電池に充電したのちに負荷に供給できる電力量は、 $\eta_i E_d$ である。

2・5 ディーゼル発電機 ディーゼル発電機は交流側でシステムと接続されている。ディーゼル発電機の燃料消費特性については、定格出力 15kW の水冷立型 4 サイクルディーゼル発電機の燃料消費量を実測した。結果を図3に示す。横軸が出力電力、縦軸がその電力で1時間運転した場合の燃料（軽油）消費量（リットル）である。この結果をもとに、燃料消費量を1次式で近似し、さらに、定格出力電力 $P_{d,max}$ とその時の燃料消費量 $C_{f,max}$ で正規化して、以後のシミュレーションに用いる。すなわち、出力電力 P_d での燃料消費量を C_f とするとき、 $p_d = P_d/P_{d,max}$ 、 $c_f = C_f/C_{f,max}$ とおく。このとき、 p_d と c_f との関係は、

$$c_f = \eta_d p_d + (1 - \eta_d) \dots \dots \dots (1)$$

図3 ディーゼル発電機の燃料消費量

Fig.3. Fuel consumption of a diesel engine generator.

で表される。実測したディーゼル発電機の場合、 $\eta_d = 0.72$ となる。

なお、太陽電池や蓄電池から電力が得られない場合でも、ディーゼル発電機単独で負荷電力を供給できるものとする。したがって、前述の負荷に対して、 $P_{d,max}$ を 5kW とした。

3. 太陽光発電電力予測を用いたシステム運用法

3・1 予測を用いない場合の運用法 システムの効率を上げるには、(1) 太陽光発電電力を最大限に利用する、(2) 充放電時の損失を減らすために充放電電力量を少なくする、(3) 単位発電電力量あたりの燃料消費量を減らすためにディーゼル発電機を定格に近い負荷率で運転することが重要である。本節では、まず、太陽光発電電力の予測を用いない場合のシステム運用法について述べる。

3・1・1 低充電電力量方式 上記の条件(1)、(2)を重視した運用方式として、通常は負荷電力から太陽光発電電力を差し引いた需要電力の不足分（不足電力と呼ぶ）をディーゼル発電機で発電し、太陽光発電電力が負荷電力を上回る場合のみ、余剰電力を蓄電池に充電することが考えられる。太陽電池の発電電力が負荷電力を下回ると、蓄電池は放電してこれを補う。文献(7)の Constant Charge-Level 法や文献(4)で比較対象としている比例制御法などは、比較的この方式に近いと考えられる。ただし、これらの文献では、負荷電力が $P_{d,max}$ を上回る場合を想定している点が若干異なる。

3・1・2 ディーゼル発電機定格出力方式 低充電電力量方式とは逆に、上記の条件(3)を重視した方式として、ディーゼル発電機を定格出力運転か停止かのどちらかで使用することが考えられる。すなわち、蓄電池の充電状態が下限設定値以下であればディーゼル発電機を起動して定格出力で運転し、負荷電力を供給するとともに蓄電池を充電する。蓄電池の充電状態が上限設定値に達するとディーゼル発電機を停止し、太陽電池と蓄電池から負荷電力を供給する。文献(6)で述べられている方式などは、この方式に近いと思われる。

3・2 ディーゼル発電機出力決定に関する考察 以上のように、蓄電池への充放電電力量を減少させることと、ディーゼル発電機を定格負荷率で運転することは、トレードオフの関係にあり、両者の折り合いをつける最適なシステム運用方法を考える必要がある。太陽光発電電力予測を用いた運用法について述べる前に、燃料消費量を最小にするディーゼル発電機の出力について簡単な考察をする。

簡単化のため、時刻 $t = iT$ から $(i+1)T$ までの時間 T の間、負荷電力は一定とし $p_l(i)$ で表す（ i は 0 以上、 $n-1$ 以下の整数）。ただし、 p_l はディーゼル発電機の定格出力電力 $P_{d,max}$ で正規化されているものとする。このとき、時系列 $p_l(0), p_l(1), \dots, p_l(n-1)$ で表される負荷にディーゼル発電機で電力を供給することを考える。

まず、負荷電力と常に等しくなるようにディーゼル発電機を運転した場合の燃料消費量 c_{f1} は、(1) 式を用いて、

$$c_{f1} = \left\{ \eta_d \sum_{i=0}^{n-1} p_l(i) + (1 - \eta_d)n \right\} T \dots\dots\dots (2)$$

と表せる。

次に、 $jT \leq t < (j+1)T$ (j は 1 以上、 $n-1$ 以下の整数) の間は、ディーゼル発電機を停止し、 $0 \leq t < jT$ の間に蓄電池に充電された電力を負荷に供給することを考える。この場合、ディーゼル発電機の出力を一旦充電してから負荷に供給する場合の効率を η_i とすると、 $p_l(j)T/\eta_i$ の電力量を $0 \leq t < jT$ の間に余分に発電する必要があるから、この場合の燃料消費量 c_{f2} は、

$$c_{f2} = \eta_d \left\{ \sum_{i=0}^{n-1} p_l(i) - p_l(j) + \frac{p_l(j)}{\eta_i} \right\} T + (1 - \eta_d)(n-1)T \dots\dots\dots (3)$$

となる。

したがって、 $c_{f1} - c_{f2}$ を計算すると、

$$c_{f1} - c_{f2} = \left\{ (1 - \eta_d) - \frac{\eta_d}{\eta_i} (1 - \eta_i) p_l(j) \right\} T \dots\dots\dots (4)$$

であるから、

$$p_l(j) < \frac{(1 - \eta_d)\eta_i}{(1 - \eta_i)\eta_d} \quad (\equiv \eta_{th}) \dots\dots\dots (5)$$

のとき、 $c_{f1} > c_{f2}$ 、すなわち、負荷電力 $p_l(j)$ を蓄電池から供給した方が、ディーゼル発電機から直接供給するよりも燃料消費量が少なくなる。このとき、 $p_l(j)$ が小さいほど、 c_{f2} が小さくなることが分かる。

以上の考察から、燃料消費量を最小にするには、負荷電力が (5) 式を満たす場合は、その間ディーゼル発電機を停止し、あらかじめ充電された蓄電池から負荷電力を供給する。逆に、負荷電力が (5) 式の右辺 (これを η_{th} とおく) 以上の場合は、ディーゼル発電機の出力を負荷電力と等しくすればよい。

3.3 太陽光発電電力予測を用いた運用法 前節の考察に基づき、これに太陽光発電電力の予測と蓄電池充電状態を考慮してディーゼル発電機の最適な出力を決定する。以下、この手順を図 4 に示す例とともに詳しく述べる。

まず、ディーゼル発電機の出力計画を立てる時刻を $t = 0$ として、 $iT \leq t < (i+1)T$ ($i = 0, 1, \dots, n-1$) 間の負荷電力と太陽光発電電力の平均値をそれぞれ、 $p_l(i)$ 、 $p_p(i)$ とし、ディーゼル発電機の出力電力を $p_d(i)$ とする。ただし、 $p_l(i)$ 、 $p_p(i)$ 、 $p_d(i)$ は、それぞれ、 $P_{d,max}$ で正規化されているものとする。

[Step 1] 負荷電力と太陽光発電電力の平均値 $p_l(i)$ 、 $p_p(i)$ ($i = 0, 1, \dots, n-1$) を予測し、不足電力 $p_l(i) - p_p(i)$ を求める。

図 4(a) に、そのイメージとして不足電力の予測例を示す。この例では、 $n = 7$ とし、 $0 \leq t < 7T$ の区間で時間 T 毎の平均電力を予測している。 $4T \leq t < 7T$ において、値

図 4 太陽光発電電力予測を用いたディーゼル発電機出力決定手順の概略

Fig. 4. Illustration of the procedure to decide DG output power using prediction of PV power.

が負になっているのは、太陽光発電電力が負荷電力を上回ることを表している。

[Step 2] 各時間帯のディーゼル発電機の出力電力 $p_d(i)$ ($i = 0, 1, \dots, n-1$) を以下のように仮に定める。

$$p_d(i) = \begin{cases} p_l(i) - p_p(i) & (p_l(i) - p_p(i) \geq \eta_{th}) \\ 0 & (p_l(i) - p_p(i) < \eta_{th}) \end{cases} \dots\dots\dots (6)$$

ただし、 η_{th} は、(5) 式の右辺で定義される値である。

図 4(b) がその例である。この場合、ディーゼル発電機は、 $0 \leq t < 2T$ の間のみ発電を行い、 $2T \leq t < 7T$ の間は停止と仮決定している。

[Step 3] $i = 0$ とする。

[Step 4] 時刻 $t = (i+1)T$ での蓄電池充電状態（放電可能な電力量）を予測し、これを $E_b(i+1)$ とする。

図 4(c) に例を示す。この例では、 $0 \leq t < 2T$ の区間、ディーゼル発電機はちょうど不足電力を発電すると仮定しているため蓄電池充電状態は変化がない。区間 $2T \leq t < 3T$ では、ディーゼル発電機が停止しているため蓄電池は放電し充電状態が低下している。

[Step 5] $E_b(i+1)$ が、定められた蓄電池充電状態の下限設定値 $E_{b,min}$ を下回った場合は、 $0 \leq j \leq i-1$ において、 $0 < p_d(j) < 1$ を満たすディーゼル発電機の出力 $p_d(j)$ を $E_b(i+1) = E_{b,min}$ となるように増加させる。

図 4 の例では、 $E_b(3)$ が $E_{b,min}$ を下回っている（同図(c)）。したがって、同図(d)に示すように、 $p_d(0), p_d(1)$ を、 $\{E_{b,min} - E_b(3)\}/\eta_i$ の電力量を余分に発電するように増加させる。このとき、 p_d の最大値は 1 である。

[Step 6] Step 5 の操作後も $E_b(i+1) < E_{b,min}$ である場合は、 $0 \leq j \leq i$ 、かつ、 $p_d(j) = 0$ を満たす j のなかで、 $p_l(j) - p_p(j)$ を最大とする j を j_{max} としたとき、 $p_d(j_{max}) = 1$ とする。

図 4 の例では、 $E_b(4)$ が $E_{b,min}$ を下回っている（同図(e)）。しかし、 $p_d(0)$ と $p_d(1)$ がすでに 1 であるため、Step 5 の操作でディーゼル発電機の出力を上げることはできない。そこで、ディーゼル発電機を停止すると仮定していた区間 $2T \leq t < 4T$ のうち、 $p_l(2) - p_p(2) > p_l(3) - p_p(3)$ であることから、区間 $2T \leq t < 3T$ において、ディーゼル発電機の出力電力 $p_d(2)$ を 1 とする（同図(f)）。

[Step 7] $E_b(i+1)$ が、蓄電池容量 $E_{b,max}$ を超える場合は、蓄電池充電状態 $E_b(j)$ 、($j = 1, 2, \dots, i+1$) が $E_{b,min}$ を下回らないという制約条件の下で、ディーゼル発電機の出力 $p_d(j)$ 、($j = 0, 1, \dots, i$) を $E_b(i+1) \leq E_{b,max}$ となるよう減少させる。

図 4 の例では、太陽光発電電力が負荷電力を上回り蓄電池を充電するため、 $E_b(7)$ が $E_{b,max}$ を超えている（同図(g)）。したがって、 $p_d(2)$ を低下させる（同図(h)）ことにより、 $E_b(7) = E_{b,max}$ としている（同図(i)）。

[Step 8] i の値を 1 増加させ、Step 4 に戻る。これを、 $i = n-1$ まで繰り返す。

図 4 の例では、最終的に同図(h) がディーゼル発電機の発電計画となる。なお、これはディーゼル発電機の出力決定手順を説明するための例であるのでここで留めているが、 $t > 7T$ でも太陽光発電電力が負荷電力を上回ると予測されるならば、さらに $p_d(2)$ を下げて蓄電池充電状態を下限を下回らない範囲で低く抑える必要がある。

4. シミュレーションによる検証

4.1 シミュレーション方法 提案手法を検証するため、2000 年の 1 月から 12 月のうち、装置の都合などで計測できなかった日を除く 354 日の太陽光発電電力の実測データを用いてシミュレーションを行った。計測は 5 秒間隔で行っており、シミュレーションもこれに合わせて 5 秒

間隔で各値の計算を行っている。

ディーゼル発電機の出力電力は、30 分毎の太陽光発電電力と負荷電力の平均値を 24 時間予測して決定した（3.3 で述べた T を 30 分、 n を 48 としている）。この運転計画は、やはり 30 分毎に更新している。

4.2 太陽光発電電力の予測方法 太陽光発電電力の予測については、文献(9)の方法をやや簡略化して応用した。その概略は、以下のとおりである。

時刻 t における傾斜面（傾斜角 β ）の晴天時の全天日射量瞬時値 $H(t)$ は、直達成分と散乱成分から次式で近似できる⁽¹⁷⁾。

$$H(t) = I_0 A^{\csc h(t)} \cos \theta(t) + \frac{I_0 \sin h(t) \{1 - A^{\csc h(t)}\}}{2(1 - 1.4 \ln A)} \frac{(1 + \cos \beta)}{2} \dots \dots \dots (7)$$

ここで、 I_0 は大気外日射強度、 A は大気透過率である。また、 $h(t)$ は太陽高度、 $\theta(t)$ は傾斜面への太陽光入射角であり、 ψ を観測地点の緯度、 δ を赤緯として、

$$\sin h(t) = \sin \psi \sin \delta + \cos \psi \cos \delta \cos w(t) \dots \dots (8)$$

$$\cos \theta(t) = \sin h(t) \cos \beta + \cos h(t) \sin \beta \cos \{\alpha(t) - \alpha'\} \dots \dots (9)$$

$$\cos \alpha(t) = \frac{\sin h(t) \sin \psi - \sin \delta}{\cos h(t) \cos \psi} \dots \dots \dots (10)$$

と表せる。ただし、 $w(t)$ は南を 0 とした太陽の時角、 $\alpha(t)$ は太陽の方位角、 α' は南を 0 とした傾斜面の方位角である。

したがって、予測を行う時刻を $t = t_0$ とし、 $t(i) \equiv t_0 + iT$ と定義したとき、 $t(i) \leq t < t(i+1)$ 間の晴天時に得られる太陽光発電電力量の理論的な最大値は、

$$E_p(i) = \int_{t(i)}^{t(i+1)} H(t) A_p \eta_p dt \dots \dots \dots (11)$$

で与えられる。ただし、 A_p は太陽電池の面積、 η_p は総合効率（太陽電池効率、インバータ効率など）であり、ここでは実測値との比較から 0.1 を用いている。このとき、太陽光発電電力の $t(i) \leq t < t(i+1)$ 間の平均電力の正規化された予測値 $p_p(i)$ は、 $t(-1) \leq t < t(0)$ 間の太陽光発電電力量の実測値を $E_{p,mes}$ としたとき、

$$p_p(i) = E_p(i) \frac{E_{p,mes}}{E_p(-1)} \frac{1}{TP_{d,max}} \dots \dots \dots (12)$$

で与えられる。

なお、この方法では、 $E_{p,mes}$ や $E_p(-1)$ が小さくなる早朝や、また、翌日の予測には向かない。このため、午前 9 時まで、および、翌日の予測値には $E_p(i)/TP_{d,max}$ （その時間帯が晴天であれば期待できる最大の電力）を用いた。これは、予測値を考えられる最大値にしておくことで、蓄電池充電状態を低めに抑え、蓄電池が満充電になる状態をなるべく避けるためである。

4.3 太陽光発電電力予測の精度 太陽光発電電力予測の実例を図5に示す。薄い色で示しているのが実測値、黒い実線が予測値である。同図(a)は、1日中ほぼ晴天であった2000年4月1日の例で、予測と実測がよくあっていることが分かる。同図(b)は、ほぼ曇っていた同2日の例であり、午前9時までは実測値に比べて予測値がかなり高い。9時以降は、実測値に変動がある場合は、予測値が1ステップ(30分)「遅れた」形になっているが、それ以外では実測値に比較的近い時間帯も多い。

1年間の太陽光発電電力データに基づき、午前9時以降の予測精度を調べたところ、30分間の平均電力の年間最大値7.8kW、年間平均値2.6kWに対して、予測値の平均二乗誤差は0.74kWであった。

4.4 シミュレーション結果

4.4.1 ディーゼル発電機出力電力の例 図6にシミュレーション結果の例としてディーゼル発電機の出力電力などを示す。比較のため、3.1.1項で述べた低充電電力方式(Method 1)、3.1.2項のディーゼル発電機定格出力方式(Method 2)の結果も併せて示している。同図(a)がMethod 1、同図(b)がMethod 2の結果、同図(c)は、完全な予測が行える理想的な場合として予測の代わりに実測値を用いた結果、同図(d)は、前述の予測方法を用いた結果である。どちらも2000年4月1日~2日にかけての48時間のシミュレーション結果であり、薄い色の線が不足電力、黒い実線がディーゼル発電機出力電力、点線が蓄電池充電状態を示している。また、表1に、このシミュレーションで求められた燃料消費量などを示す。なお、燃料消費量は、ディーゼル発電機を定格出力で1時間運転し

たときの燃料消費量を1として表している。

シミュレーション条件として、 $\eta_d = 0.72$ 、 $\eta_b = 0.90$ 、 $\eta_i = 0.80$ と仮定した。蓄電池容量は15kWhとし、充電状態の下限を0.3kWhとしている。このシミュレーション条件の場合、(5)式の η_{th} の値は約1.6となり、 $p_i(i) - p_p(i) < \eta_{th}$ が常に成り立つ。したがって、不足電力が多いときにディーゼル発電機を定格出力で運転し、不足電力が少ないときには停止する運用方法が最も燃料消費量を抑えることができる。

以上の点をふまえてシミュレーション結果について考察する。まず、図6(a)のMethod 1では、蓄電池の充放電電力を最小にするため、通常は、ディーゼル発電機で不足電力を過不足なく供給し、太陽光発電電力が負荷電力を上回る場合のみ蓄電池に充電する。図の例では、0~4時30分頃と8~20時頃のみ蓄電池が充放電され、それ以外はディーゼル発電機が不足電力を供給している。表1から分かるように、ディーゼル発電機発電電力量と蓄電池への充電電力量は、他の方式に比べて最も少ないが、ディーゼル発電機の平均負荷率が0.41と低いため、燃料消費量は20.62と最も多くなってしまっている。

次に、図6(b)のMethod 2では、蓄電池充電状態が0になれば、ディーゼル発電機を起動して定格出力で運転し、蓄電池充電状態が容量の80%(12kWh)以上になれば停止する。このため、ディーゼル発電機は燃費の良い定格出力でしか運転しないが、その分、蓄電池への充電電力量が73.13kWhと多くなっている。また、8時の段階で蓄電池に既に約8kWh充電されているため、10時頃には満充電状態になってしまっている。その結果、最大電力制御を行えば得られるはずの15.40kWhが充電できずに無駄になっている。

さて、図6(c)の提案する予測を用いた運用方法で予測が完全に誤差を含まない場合では、4~7時の時間帯は、その日の太陽発電電力量が十分であることから、蓄電池充電状態を低めに抑えるためにディーゼル発電機の起動と停止を繰り返し、必要最小限の発電を行っている。特に、6時30分~7時は、出力を定格値より下げており(図中の矢印A)、その結果、図中矢印Bで示すように蓄電池充電状態が下限まで下がっている。これにより、蓄電池が満充電状態(図中矢印Cで示す時刻以降)にあるため充電できない太陽光発電電力量を4.44kWhとMethod 1と同程度に小さくすることができる。17時~23時の時間帯では、不足電力が多いため基本的にはディーゼル発電機を運転するが、蓄電池も高い充電状態であることから蓄電池容量を超えないように時々ディーゼル発電機を停止している。その後は、不足電力が多い時間帯にディーゼル発電機を定格出力で運転し、その他の時間帯は停止するという理想的な状態で運転されている。このように、ディーゼル発電機を定格出力の運転にほぼ限定しながら、Method 2に比べて、蓄電池への充電電力量を48.24kWhと極力少なくしており、結果として燃料消費量も15.91と最少である。

最後に、図6(d)に示す誤差を含む実際の予測方法を用い

図5 太陽光発電電力予測の例

Fig. 5. Examples of prediction of PV power.

図 6 シミュレーション結果の例 (2000 年 4 月 1 日 ~ 2 日)

Fig. 6. An example of simulation results (Apr. 1st to 2nd, 2000).

表 1 図 6 の例における燃料消費量など

Table 1. Fuel consumption etc. in case of Fig.6.

	DG generated energy	Battery charge energy	PV energy that could not be charged into battery	Average load factor	Fuel consumption
Method 1	73.44 kWh	29.91 kWh	4.22 kWh	0.41	20.62
Method 2	94.05 kWh	73.13 kWh	15.40 kWh	1.00	18.81
Ideal prediction	79.07 kWh	48.24 kWh	4.44 kWh	0.98	15.91
Real prediction	81.37 kWh	52.22 kWh	6.15 kWh	1.00	16.27

た場合について考察する。理想的な場合との相違点として、図中矢印 D に示すように、蓄電池充電状態を下限まで下げ切れていないため、満充電となる時刻 (図中矢印 E) がやや早まり、充電できない太陽光発電電力量が 6.15 kWh とやや増えている。そのほか、30~33 時 (2 日の午前 6~9 時) の時間帯では、太陽光発電電力の予測値が実際より大きいことから、蓄電池を低い充電状態に保つため、ディー

ゼル発電機の停止が多くなっている。ところが、実際には太陽電池から電力があまり得られていないため、37 時 (2 日 13 時) にディーゼル発電機の起動を余儀なくされている (図中矢印 F)。しかし、全体的には理想的な場合と似たパターンでディーゼル発電機が運転されており、燃料消費量も 16.27 と理想的な場合に近い。

4.4.2 燃料消費量の比較 図 7 に年間燃料消費量の

図 7 各運用方式による年間燃料消費量（蓄電池容量を変化させた場合，太陽光発電設備容量 10 kW， $\eta_d = 0.72$ ， $\eta_b = 0.90$ ， $\eta_i = 0.80$ ）

Fig. 7. Annual fuel consumption by each operating method (with varying battery capacity, PV maximum power 10 kW, $\eta_d = 0.72$, $\eta_b = 0.90$, $\eta_i = 0.80$).

シミュレーション結果を示す。横軸は蓄電池容量で 5 kWh 毎に変化させており、縦軸は燃料消費量である。「Ideal」が予測に誤差を含まない理想的な場合、「Prediction」が前述の予測を行った場合であり、比較のため Method 1，Method 2 の結果も示す。なお，Method 1 の蓄電池容量 0 kWh の場合は，蓄電池を全く用いない場合で，不足電力をディーゼル発電機で供給するだけの運用方法となる。

Method 1 では，蓄電池の充放電電力量は少ないが，ディーゼル発電機を低負荷率で運転することが多いため燃料消費が最も多くなっている。Method 2 では，ディーゼル発電機を燃費のよい定格出力でしか運転しないが，その後の太陽光発電電力量と関係なく充電を行っているため蓄電池が満充電状態になっている時間が多く，太陽光発電電力を有効に利用できていない。これに対して，予測を行うことにより，ディーゼル発電機を定格出力の運転にほぼ限定しながら充放電電力量を減らし，燃料消費量を減少させることに成功している。当然，予測には誤差が含まれているが，理想的な場合と比較しても燃料消費量は 0.3（蓄電池容量 15～30 kWh 時）～1.4%（蓄電池容量 5 kWh 時）しか増えておらず，本方式は有効といえる。

図 8 は，太陽光発電装置の設備容量を 5 kW～25 kW まで 5 kW ずつ変化させて計算を行った結果である。なお 25 kW の場合，年間の発電電力量（最大電力を取り出した場合）は負荷電力量とほぼ等しくなる。蓄電池容量は 50 kWh とした。この結果から，太陽光発電の設備容量を変えてもやはり予測を行うことで燃料消費量を削減できることが分かる。理想的な場合との比較では，図ではスケールの関係で両者がほぼ重なっているが，やはり，0.3（太陽光発電 5 kW，10 kW 時）～1.3%（太陽光発電 25 kW 時）の燃料消費量の増加で収まっている。

次に，充電効率をもっと低い場合を仮定し， $\eta_d = 0.85$ ， $\eta_b = 0.80$ ， $\eta_i = 0.70$ とした場合の計算結果を図 9 に示す。

図 8 各運用方式による年間燃料消費量（太陽光発電設備容量を変化させた場合，蓄電池容量 50 kWh， $\eta_d = 0.72$ ， $\eta_b = 0.90$ ， $\eta_i = 0.80$ ）

Fig. 8. Annual fuel consumption by each operating method (with varying PV maximum power, $E_{b,max} = 50$ kWh, $\eta_d = 0.72$, $\eta_b = 0.90$, $\eta_i = 0.80$).

図 9 各運用方式による年間燃料消費量（蓄電池容量を変化させた場合，太陽光発電設備容量 10 kW， $\eta_d = 0.85$ ， $\eta_b = 0.80$ ， $\eta_i = 0.70$ ）

Fig. 9. Annual fuel consumption by each operating method (with varying battery capacity, PV maximum power 10 kW, $\eta_d = 0.85$, $\eta_b = 0.80$, $\eta_i = 0.70$).

太陽光発電の設備容量は 10 kW である。この場合，(5) 式の η_{th} は 0.41 となるので，提案手法では，ディーゼル発電機を定格出力のみではなく，負荷率を 0.41 までは落として運転する場合も出てくる。図 7 の結果と比較すると， η_d を上げているため，Method 1 の燃料消費量が少なくなり，予測を用いた運用法では充電効率の低下から燃料消費量が増加しているが，それでも他の方法より燃料消費量が少ないことに変わりない。予測を用いた運用法を理想的な場合と比較すると，0.7（蓄電池 30 kWh 時）～1.7%（蓄電池 5 kWh 時）の燃料消費量の増加となり，やや増加の割合が増えているがわずかである。

最後に，図 2 の負荷曲線とは全く異なる負荷を用いて検証した結果を図 10 に示す。これは，負荷電力を， $3 \text{ kW} \pm P_x$ の範囲内で 1 時間毎に乱数で決定したもので，同図の横軸が P_x を表している。すなわち，横軸が 0 の場合は，負荷電力が 3 kW 一定で 1 年間全く変動しない場合，横軸 2.0 kW

図 10 各運用方式による年間燃料消費量（負荷のタイプを変化させた場合，太陽光発電設備容量 10kW，蓄電池容量 15kWh， $\eta_d = 0.72$ ， $\eta_b = 0.90$ ， $\eta_i = 0.80$ ）

Fig. 10. Annual fuel consumption by each operating method (with varying types of loads, PV maximum power 10kW, $E_{b,max} = 15$ kWh, $\eta_d = 0.72$, $\eta_b = 0.90$, $\eta_i = 0.80$).

の場合は，負荷電力が 1kW から 5kW の範囲内で絶えず変動している場合である。ただし，年間の総負荷電力量は等しくなるように調節している。蓄電池容量は 15kWh で，その他の条件は図 7 のシミュレーションと同じである。このように，負荷が一定でも激しく変動しても，各方式ともあまり大きな違いはないことが分かる。ただ，理想的な場合は，負荷変動が激しいほど燃料消費量がやや下がっているが，これは，負荷変動が激しいと高負荷と低負荷の差が大きくなるために，高負荷率のときにディーゼル発電機を運転し，低負荷率のときにはディーゼル発電機を停止する本提案方式の効果がよく現れていると考えられる。実際の予測を用いた場合では，あまりその効果が現れていないが，負荷が激しく変動する場合でも Method1，Method2 に比べて燃料消費量を減らせることに違いはない。

5. おわりに

本論文では，太陽光・ディーゼルハイブリッド発電システムにおいて，太陽光発電電力をあらかじめ予測したうえでディーゼル発電機の最適な出力電力を決定する方法を提案した。提案手法は，(1) 太陽光発電電力を有効に利用する，(2) 蓄電池充放電電力量を減らす，(3) ディーゼル発電機を最適な負荷率で運転することにより，ディーゼル発電機の燃料消費量を削減することを目的としたものである。2000 年のほぼ 1 年間の太陽光発電電力の実測データを用いてシミュレーションを行ったところ，簡単な予測方法を用いても他の運用方法よりも燃料消費量を削減できることが確認された。

本研究により提案手法の有効性が確認されたので，今後は，実用化する上での詳細な検討と実システムによる検証が望まれる。また，本論文では，ディーゼル発電機の燃料消費量のみで評価を行っているが，システムの運用方法に

よっては，ディーゼル発電機や蓄電池のメンテナンスコストなどが異なってくることが当然考えられる。今後，これらの点も含めて総合的なシステムのコスト，あるいは，CO₂ 排出量などの評価を行っていく必要もある。さらに，予測方法についても，今回用いた方法では，翌日の太陽光発電電力を（1 年のうちの）その日に考えられる最大の電力としている点など，まだ改善の余地が残されており，検討を続ける予定である。

（平成 15 年 3 月 24 日受付，平成 15 年 11 月 17 日再受付）

文 献

- (1) T. Katagi, E. Nishikawa, and T. Hashimoto: "An application of photovoltaic generating system to a large ship and its environmental estimation", *J. JSES*, Vol.24, No.1, pp.41-46 (1998-1) (in Japanese)
片木 威・西川栄一・橋本 武:「太陽光発電システムの大型船舶への応用と環境評価」, 太陽エネルギー, 24, 1, pp.41-46 (1998-1)
- (2) T. Katagi, J. Park, and T. Hashimoto: "Basic design of electric power system with photovoltaic system for ships", *T. IEE Japan*, Vol.118-B, No.9, pp.976-982 (1998-9) (in Japanese)
片木 威・朴 在植・橋本 武:「太陽電池を搭載する船舶電源システムの基本設計」, 電学論 B, 118, 9, pp.976-982 (1998-9)
- (3) C.V. Nayar, S.J. Phillips, W.L. James, T.L. Pryor, and D. Remmer: "Novel wind/diesel/battery hybrid energy system", *Solar Energy*, Vol.51, No.1, pp.65-78 (1993)
- (4) Y. Kemmoku, H. Nagaïke, S. Nakagawa, T. Kawamoto, and T. Sakakibara: "Adaptive fuzzy control for fuel reduction of photovoltaic/wind/diesel power generation system", *T. IEE Japan*, Vol.118-B, No.11, pp.1284-1291 (1998-11) (in Japanese)
見目喜重・永池 博・中川重康・河本 映・榊原建樹:「太陽光/風力/ディーゼル発電システムの燃料削減を目的とした適応型ファジィ制御」, 電学論 B, 118, 11, pp.1284-1291 (1998-11)
- (5) M. Ashari and C.V. Nayar: "An optimum dispatch strategy using set points for a photovoltaic(PV)-diesel-battery hybrid power system", *Solar Energy*, Vol.66, No.1, pp.1-9 (1999)
- (6) M. Muselli, G. Nottton, and A. Louche: "Design of hybrid-photovoltaic power generator, with optimization of energy management", *Solar Energy*, Vol.65, No.3, pp.143-157 (1999-2)
- (7) Y. Ismail, Y. Kemmoku, H. Takikawa, and T. Sakakibara: "An operating method for fuel savings in a stand-alone wind/diesel/battery system", *J. JSES*, Vol.28, No.2, pp.31-38 (2002)
- (8) S. Yamamoto, T. Katagi, J. Park, T. Hashimoto, and T. Hashimoto: "A basic study to forecast the power fluctuation of the photovoltaic power generation by image processing of clouds", *T. IEE Japan*, Vol.119-B, No.8/9, pp.909-915 (1999-8) (in Japanese)
山本茂広・片木 威・朴 在植・橋本 武・橋本 岳:「雲の画像解析による太陽光発電の出力変動予測に関する基礎的研究」, 電学論 B, 119, 8/9, pp.909-915 (1999-8/9)
- (9) S. Yamamoto, T. Hashimoto, and T. Hashimoto: "A basic study on estimation of solar irradiation for photovoltaic power generation", *T. IEE Japan*, Vol.121-B, No.12, pp.1708-1715 (2001-12) (in Japanese)
山本茂広・橋本 岳・橋本 武:「太陽光発電のための日射量積算値の予測に関する基礎的研究」, 電学論 B, 121, 12, pp.1708-1715 (2001-12)
- (10) T. Hashimoto, M. Sakai, S. Yamamoto, and T. Hashimoto: "A basic study on image processing method to classify types of clouds for photovoltaic power generation", *T. IEE Japan*, Vol.121-C, No.12, pp.1875-1882 (2001-12) (in Japanese)
橋本 岳・酒井基裕・山本茂広・橋本 武:「太陽光発電のための画像処理による雲分類に関する基礎的研究」, 電学論 C, 121, 12, pp.1875-1882 (2001-12)
- (11) Y. Kemmoku, H. Ishii, H. Takikawa, T. Kawamoto, and T. Sakakibara: "Method of forecasting wind velocity of next day

using weather data over wide area”, *J. JSES*, Vol.27, No.1, pp.85–91 (2001-1) (in Japanese)
見目喜重・石井弘樹・滝川浩史・河本 映・榊原建樹:「広域の気象データを利用した翌日の風速予測」, *太陽エネルギー*, **27**, 1, pp.85–91 (2001-1)

- (12) Y. Kemmoku, H. Nakayama, H. Takikawa, and T. Sakakibara: “A method for forecasting insolation using artificial neural network and operation of a solar thermal/night-only electricity hot-water supply system”, *J. JSES*, Vol.28, No.6, pp.27–32 (2002) (in Japanese)
見目喜重・中山洋展・滝川浩史・榊原建樹:「ニューラルネットワークによる日射量予測とそれを利用した太陽熱/深夜電力給湯システムの運用」, *太陽エネルギー*, **28**, 6, pp.27–32 (2002)
- (13) 大川康治・玉城史朗・名嘉村盛和・翁長健治:「マルチハイブリッド発電システムのための自然エネルギー予測に基づく遠隔実時間スケジューリング」, *通信学会技報*, NLP99-49, pp.23–28 (1999-7)
- (14) T. Ishida and S. Tamura: “Daily electric load forecasting using artificial neural network”, *T. IEE Japan*, Vol.114-B, No.11, pp.1109–1115 (1994-11) (in Japanese)
石田隆張・田村 滋:「ニューラルネットワークを用いた翌日電力需要予測」, *電学論 B*, **114**, 11, pp.1109–1115 (1994-11)
- (15) J.F. Manwell and J.G. McGowan: “Lead acid battery storage model for hybrid energy systems”, *Solar Energy*, Vol.50, No.5, pp.399–405 (1993)
- (16) J.B. Copetti and F. Chenlo: “Lead/acid batteries for photovoltaic applications. Test results and modelling”, *J. Power Sources*, Vol.47, 109–118 (1994)
- (17) 太陽エネルギー利用ハンドブック編集委員会編: 太陽エネルギー利用ハンドブック, 1.1.1 節, 1.2.7 節, 日本太陽エネルギー学会 (1985)

山 本 茂 広 (正員) 1967 年生。1996 年京都大学大学院工学研究科電気工学専攻博士課程研究指導認定退学。

同大学の非常勤研究員を経て, 1997 年神戸商船大学商船学部助手, 2000 年同助教授, 2003 年大学統合により神戸大学海事科学部助教授となり現在に至る。この間, 移動体の自律走行に関する研究, 太陽光発電電力予測の研究に従事。博士(工学)。システム制御情報学会, 日本ロボット学会, 日本マリンエンジニアリング学会などの会員。

角 和 芳 (正員) 1967 年生。1990 年神戸商船大学商船学部原子動力学科卒業。日本郵船株式会社勤務の後, 1997 年海技大学校機関科助手, 2002 年同助教授となり現在に至る。この間, 自然エネルギーの船舶電源への導入に関する研究に従事。日本マリンエンジニアリング学会, 日本造船学会, 日本風力エネルギー協会などの会員。

西 川 榮 一 (非会員) 1940 年生。1963 年大阪大学工学部機械工学科卒業。同大学助手, 神戸商船大学商船学部助教授を経て, 1987 年同教授, 2003 年大学統合により神戸大学海事科学部教授となり現在に至る。この間, 交通機関の輸送エネルギー効率, 環境保全型エネルギー技術に関する研究に従事。工学博士。日本機械学会, 日本マリンエンジニアリング学会, 日本造船学会, 関西造船協会, 日本環境学会などの会員。

橋 本 武 (正員) 1938 年生。1961 年神戸商船大学商船学部機関学科卒業。同大学の助手, 講師, 助教授などを経て, 1985 年同大学商船学部教授となる。2002 年同大学を停年退官, 現在は, 中部工業(株)顧問。この間, 船舶の信頼性・保全性に関する研究に従事。工学博士。神戸商船大学名誉教授。日本信頼性学会, 日本マリンエンジニアリング学会, システム制御情報学会などの会員。