

太陽光発電システムの大型船舶への応用と環境評価

AN APPLICATION OF PHOTOVOLTAIC GENERATING SYSTEM TO A LARGE SHIP AND ITS ENVIRONMENTAL ESTIMATION

片 木 威^{*1}
Takeshi KATAGI西 川 栄 一^{*1}
Eiichi NISHIKAWA橋 本 武^{*2}
Takeshi HASHIMOTO

Abstract

Releasing of polluted gases such as NO_x or SO_x from the ship to the atmosphere has been concerned increasingly. To reduce the pollution of the marine environment, the application of photovoltaic energy to the ship is highly regarded, since photovoltaic energy is an alternative clean energy source to fossil fuels.

In this paper, the photovoltaic generating system based on the photovoltaic array is applied to a car carrier in order to supplement its diesel engine for generating electric power. In this case, the amount of NO_x and SO_x emission is proved to be significantly reduced after the installment of the photovoltaic generating system.

Key words : photovoltaic generating system, diesel engine generator system, car carrier, NO_x emission, SO_x emission.

1. 緒 言

船舶においてディーゼル機関より排出されるNO_xやSO_x等の大気汚染物質が問題となっており、それらの低減方法が種々検討されている⁽¹⁾。

本研究は船舶からのNO_xやSO_x排出量の低減方法の一つとして太陽光発電システムの船舶への応用を考えたものである。すなわち、太陽光発電システムにより船内電力の一部を供給することで、発電用ディーゼル機関の容量を小さくし、発電用ディーゼル機関からのNO_xやSO_x排出量の低減を図ろうとするものである。

一方、船舶への太陽光発電システムは、レジャーボートや競技用ボートの推進駆動用^{(2)~(4)}に応用されている。また、船舶船内電源への応用は小型船舶に限定されていて^{(5)~(6)}、いまだ、大型船舶への応用を考察した研究は少ない⁽⁷⁾。しかし、発電用ディーゼル機関の容量を小さくするというに着目するならば、大型船舶の船内電力へも太陽光発電システムの応用は十分可能だと考える。

本論文は、実際の船舶を対象にして、太陽光発電システムを組み込んだ船内電力システムの設計を行い、太陽光発電システムの船内電力への応用の可能性を理論的に検討し、さらにそのシステムの環境面への有効性を考察する。具体的にはまず、実際の自動車運搬船の航路、気象データおよび使用電力量を航海日誌ならびに機関日誌から読みとる。次に太陽電池アレイ設置面積の検討、日射量からの太陽光発電量の計算、蓄電池やインバータの容量計算を行い、太陽光発電システムを組み込んだ船内電力システムを設計する。さらに、その電力システムとディーゼル発電機のみで構成されている現行の電力システムからのNO_x、SO_x排出量を求め、それらを比較検討することで、太陽光発電システムを組み込んだ電力システムの環境面への有効性を考察する。

2. 対象とする船舶

2・1 自動車運搬船

全ての種類の船舶の船内電力に太陽光発電システムが応用できるとは考えられない。例えば、タンカー等では甲板上にパイプが張り巡らされており、太陽電池アレイ設置面積が確保できない。そのため、本研究では、甲板上にスペースがあり、かつ甲板上での作業が

*原稿受付 平成8年12月4日

*1会員 神戸商船大学(〒658 神戸市東灘区深江南町5-1-1)

*2非会員 神戸商船大学(〒658 神戸市東灘区深江南町5-1-1)

行われない自動車運搬船を選ぶ。

対象とする自動車運搬船は大阪商船三井船舶（株）所有で、その主要目を表1に示す。

表1 自動車運搬船の主要目

船体		
全長	188.2	m
幅	28.20	m
総トン数	38349	t
主機		
船用低速ディーゼル機関	1	基
連続最大出力	126000	PS
連続回転数	110	rpm
発電用原動機		
縦型単動ディーゼル機関	3	基
出力	1100	PS
回転数	720	rpm
発電機		
船舶用三相交流発電機	3	基
電圧	440	V
周波数	60	Hz
容量	750	kW
回転数	720	rpm

また、現行の電力システムを図1に示す。

現行の電力システムは、ディーゼル発電機3基で、操舵機、ポンプ、ファン等のAC440V系統、バウスラスタへのAC3300V系統、船倉装置等のAC220V系統、照明装置等のAC100V系統に電力を供給している。なお、非常用として非常用ディーゼル発電機（発電容量108kW）を装備している。

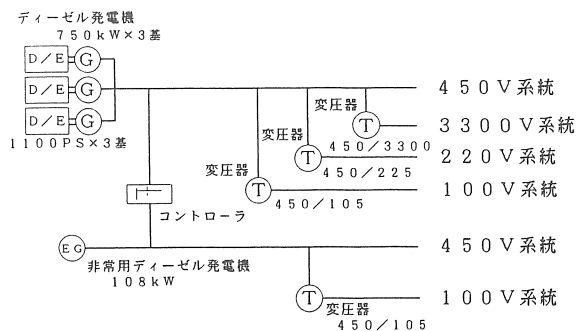


図1 現行の電力システム

2・2 航路

この自動車運搬船の1993年5月24日から1994年3月16日の航海を対象とする。この航路を図2に示す。1993年5月24日～7月12日の東京－クウェート往復航路、7月12日～10月21日の横浜－クウェート－広島－アデレード（オーストラリア）－横浜航路、12月22日～1994年3月16日の横浜－アビジャン（コートジボアール）往復航路の236日の航海について検討する。なお、10月22日～12月21日まではドック中なので、使用電力量は零であり、この期間は対象外とする。最大使用電力量／日、最小使用電力量／日および平均使用電力量／日はそれぞれ、8月3日の18000kWh、9月11日の2400kWh、9871.4kWhとなっている。そして、現行の電力システムにおけるディーゼル発電機の、最大稼働率が33.3%になっている。



図2 航路と使用する日射量計測点

3. 太陽光発電システムを組み込んだ電力システム

本章では、前章で示した自動車運搬船の航路、気象データから太陽電池アレイ設置面積の検討、太陽光発電量の計算および蓄電池やインバータの容量計算を行い、太陽光発電システムを組み込んだ船内電力システムを設計する。

3.1 太陽光発電量

船舶は移動体のため、航路によって太陽電池アレイの緯度と方位角が変わり、また、船体動揺によって傾斜角が絶えず変化するので、図3に示すように、太陽電池アレイは水平に設置する。そして、甲板上での作業の妨げにならずに、かつ煙突等構造物の影の影響がほとんどないところに面積2240㎡の太陽電池アレイを設置する。

設置面積 2 2 4 0 ㎡

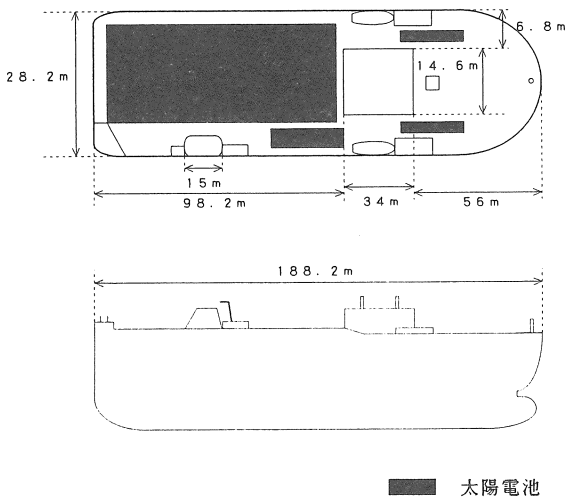


図3 太陽電池アレイの設置

次に設置した太陽電池アレイからの発電量を計算する。太陽電池モジュールは多結晶シリコン（理想変換効率11.9%）のものをを用いる。

太陽光発電量は次式を用いて計算する⁽⁸⁾。

$$P_{dc} = H_A \cdot A \cdot \eta_{th} \cdot K \quad [\text{kWh/日}] \quad \cdots \cdots (1)$$

ただし、 P_{dc} : 太陽光発電量 [kWh/日]

H_A : アレイ面日射量 [kWh/㎡/日]

A : 太陽電池アレイ面積 [㎡]

η_{th} : 標準状態における太陽電池モジュールの変換効率

K : 総合設計係数

ここで、総合設計係数は次式で表される⁽⁹⁾。

$$K = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5 \cdot K_6 \quad \cdots \cdots (2)$$

K_1 : 素子温度に対する補正係数

$$K_1 = 1 - a \cdot (T - 25) \quad \cdots \cdots (3)$$

本研究では、多結晶シリコンなので、 $a = 0.005$ を用いる。なお、太陽電池素子温度は実測していないので航海日誌に記載されている気温から次式を用いて求める⁽¹⁰⁾。

$$T = T_a + 0.03 \cdot E \quad [^\circ\text{C}] \quad \cdots \cdots (4)$$

ただし、 T : 温度 [°C]

T_a : 気温 [°C]

E : パネル面日射強度 [W/㎡]

K_2 : 経時変化、表面汚損に対する補正係数

本研究では海上環境を考慮して、 $K_2 = 0.9$ とする。

K_3 : 最大出力からのずれに対する補正係数

本研究では、 $K_3 = 0.95$ とする。

K_4 : 直並列接続に対する補正係数

本研究では、 $K_4 = 0.95$ とする。

K_5 : 直流電線路損失に対する補正係数

本研究では、 $K_5 = 0.95$ とする。

K_6 : インバータの効率等

本研究では、 $K_6 = 0.9$ とする。

ここで(1)式におけるアレイ面日射量は、アレイが水平に設置されているので全天日射量を用いる。しかし航海中での全天日射量が実測されていないので、航路地点に最も緯度ならびに経度が近く、かつ高度の低い計測地を、日本気象協会「太陽光発電システム実用化技術開発の気象データの調査研究」のデータから選択し、その計測地の日射量をその航路地点での日射量とする。具体的に示すと、5月24日は東京（北緯35度41分、東経139度46分）の日射量データを使用し、6月9日、北緯23度19分、東経122度51分での航路時においては、花蓮（台湾、北緯24度0分、東経121度36分）の日射量データを使用し、6月16日、北緯4度31分、東経82度38分での航路時、6月17日、コロンボ（スリランカ）寄港時、7月2日、北緯5度48分、東経84度40分での航路時においては、コロンボ（スリランカ、北緯6度54分、東経79度52分）の日射量データを使用する。図2に使用する日射量計測地を●として示している。

太陽光発電量を求めた結果、最大は1月24日の1647.3kWh/日、最小は1月1日の332.9kWh/日、平均は987.6kWh/日を得る。図4に使用電力量と太陽光発電量を示す。そして、使用電力量に対する太陽光発電量の比率を求め、図5に示す。図5から最大は9月11日の24.2%、最小は1月1日の2.1%、平均8.0%の比率であることがわかる。

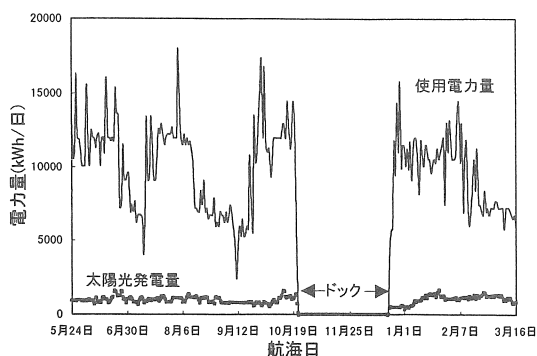


図4 使用電力量と太陽光発電量

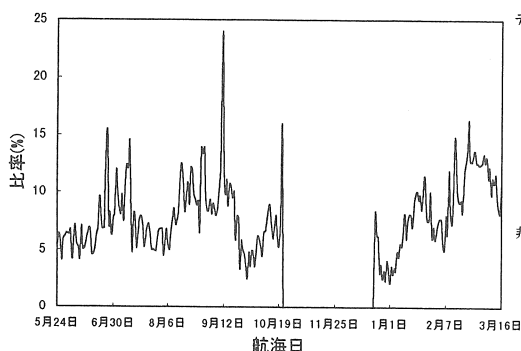


図5 使用電力量に対する太陽光発電量の比率

3・2 太陽光発電システムを組み込んだ電力システム

太陽光発電システムを組み込んだ電力システムを設計するに当たり、使用電力量に対する太陽光発電量の比率が約10%弱と小さいので、ディーゼル発電機との並列運転を考える。そして、太陽光発電システムからの出力はできるだけ有効に使用することを考える。

太陽光発電システムは太陽電池アレイ、蓄電池、インバータから構成され、蓄電池、インバータの容量はそれぞれ文献(11)の式を用いて求める。なお、省エネルギー化のため蓄電池にディーゼル発電機から充電する機能を設けることも考えられる⁽¹²⁾が、本システムではそのような機能は設けていない。今後の研究課題としたい。

ディーゼル発電機容量は、使用電力量に対する太陽光発電量の平均比率が8.0%であるので最大使用電力量である18000kWh/日の92.0%をディーゼル発電機が供給するものとし、計算すると、一基690kWと求められる。

ディーゼル機関の容量は次式を用いて求める⁽¹³⁾。

$$P_n = 1.36 \cdot P_g / (\eta_g \cdot \eta_t) \quad [\text{PS}] \quad \dots\dots\dots(5)$$

ただし、 P_n ：ディーゼル機関容量 [PS]

P_g ：発電機容量 [kW]

η_g ：発電機効率

η_t ：ディーゼル機関伝達効率

本研究では、 $\eta_t \cdot \eta_g = 0.93$ とする。

図6に太陽光発電システムを組み込んだ電力システムを示す。太陽光発電システムを組み込むことによって、ディーゼル機関容量が1000PSとなり、現行の電力システムのディーゼル機関容量1100PSに比べて約10%小型化できることがわかる。

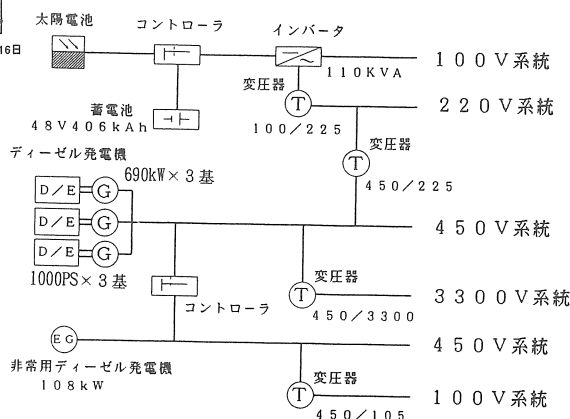


図6 太陽光発電システムを組み込んだ電力システム

4. NO_x, SO_x排出量比較による環境面への有効性

本章では、現行の電力システムと太陽光発電システムを組み込んだ電力システムからのNO_x, SO_x排出量を求め、それらを比較検討することで、太陽光発電システムを組み込んだ電力システムの環境面への有効性を考察する。

NO_x, SO_x排出量の計算は筆者の一人が提案している式を用いる⁽¹⁴⁾。

NO_x排出量は次式を用いて計算する。

$$E_{n1} = \{2.11 - 1.92 \cdot (1 - z)\} \cdot P^{1.14} \cdot 10^{-3} \cdot 46/22.4 \quad [\text{kg/h}] \quad \dots\dots\dots(6)$$

ただし、 E_{n1} ：NO_x排出量 [kg/h]

z ：ディーゼル機関負荷率

P ：ディーゼル機関容量 [kW]

図4からディーゼル機関負荷率を求める。現行の電力システムでは、負荷が500kW以上でディーゼル発電機の並列運転を行っているので、使用電力量12000kWh/日以上では2基並列運転として、ディーゼル機関負荷率を求める、また、太陽光発電システムを組み込んだ電力システムにおいても同様に、使用電力量11040kWh/日以上では2基並列運転とする。このようにして求めたNO_x排出量は、現行の電力システムにおいて、平

均5.17kg/h、太陽光発電システムを組み込んだ電力システムにおいては、平均4.56kg/hを示す。

いま、NO_x排出量低減率を、現行の電力システムでのNO_x排出量と太陽光発電システムを組み込んだ電力システムでのNO_x排出量との差を、現行の電力システムでのNO_x排出量で除したもので表す。図7にNO_x排出量低減率を示す。最大で23.2%、平均で12.3%の低減が確認できる。

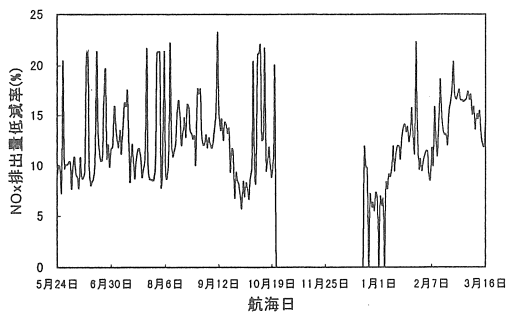


図7 NO_x排出量低減率

また、SO_x排出量は、使用燃料の硫黄含有量から次式を用いて計算する。

$$E_{st} = 0.28 \cdot C_s \cdot P^{0.95} \quad [\text{kg/h}] \quad \dots\dots(7)$$

ただし、 E_{st} : SO_x排出量 [kg/h]

C_s : 硫黄含有量

P : ディーゼル機関容量 [kW]

本研究で対象とする自動車運搬船の使用燃料は、A重油とC重油のブレンド油であるので、その硫黄含有量からSO_x排出量を求めると、現行の電力システムでは6.48kg/hに対して、太陽光発電システムを組み込んだ電力システムでは5.92kg/hの排出量を示し、約9%の低減が確認できる。

5. 結 言

実際の自動車運搬船を対象にして、太陽光発電システムを組み込んだ船内電力システムの設計を行った。さらに、そのシステムの環境面への有効性をNO_xおよびSO_x排出量から考察した。

その結果、太陽光発電システムを組み込んだ電力システムにおいては、ディーゼル機関が現行の電力システムに比べ約10%小型化できた。省エネルギー効果は約10%と小さいが、平均で約1000kWh/日の太陽光発電量があり、今後、太陽光発電システムの負荷分担等を詳細に検討することで有効な利用方法を考えていきたい。

さらに環境面においては、ディーゼル機関の約10%

小型化により、NO_x排出量が最大で約23%、平均で約12%、SO_x排出量が約9%低減されることがわかり、太陽光発電システムを組み込んだ電力システムにおける有効性も確認できた。排出量の低減率は約10%と小さいが、本論文ではkWh/日ベースでの議論であり、ディーゼル機関の運転条件によっては、排出量が大きく変化することから、今後、太陽光発電電力kWベースでの検討も行っていきたい。

最後になりましたが、資料提供に御協力戴きました大阪商船三井船舶(株)堤祐司氏および資料整理に御協力戴きました神戸商船大学小川真治学生ならびに弘灰基学生に感謝の意を表します。

文 献

- (1) シップ・アンドオーシャン財団、船舶排出ガスの環境への影響防止技術の調査報告書、1992, 1993
- (2) C. Schaffrin, The Solar Boat "KOLONA": Two Years of Experience, 10th EUROPEAN PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY CONFERENCE, LISBON, PORTUGAL, April 1991
- (3) 菊池潤他、ソーラーボートの性能特性、日本船用機関学会第52回学術講演会予稿集、平成5年10月
- (4) 増山豊、黒川浩二他、ソーラーボートの最適設計と性能評価、関西造船協会誌、No. 225、平成8年3月
- (5) 堀江謙一、ソーラーボート太平洋横断報告、太陽/風力エネルギー講演論文集(1996)、平成8年11月
- (6) 藤井嘉巳、片木威他、太陽光発電の船内電力への応用に関する検討、日本船用機関学会誌、Vol. 30, No. 12、平成7年12月
- (7) 日本船用機関学会、電気電子システム研究委員会報告、太陽光発電システムの船舶への適用に関する調査研究、No. 295、平成8年1月
- (8) 湯川元信、黒川浩助、太陽光発電システムの評価 -2- 太陽光発電システム評価技術の研究開発、電気学会論文誌C、Vol. 115, No. 1、平成7年1月
- (9) 浜川圭弘、桑野幸徳共編、太陽エネルギー工学、培風館、平成6年5月
- (10) 石原好之、太陽光発電システムの評価 -1- 太陽光発電システムの運転シミュレーション、電気学会論文誌C、Vol. 115, No. 1、平成7年1月
- (11) 太陽光発電技術研究組合監修、太陽光発電システム設計ガイドブック、オーム社、平成6年8月
- (12) 浅岡正久、宮古島太陽光発電実証研究設備、計測と制御、Vol. 35, No. 5、平成8年5月
- (13) 関西造船協会編、商船機関部計画、海文堂、昭和42年
- (14) 西川栄一他、大阪湾を航行する船舶からの大気汚染物質排出量の推定、日本船用機関学会誌、Vol. 29, No. 6、平成6年6月