研究論文

Basic Study on the Application of the System Combined Photovoltaic Power Generation and Fuel Cell to Vessels

太陽電池と燃料電池を複合したシステムの船舶への導入に関する基礎検討

Kazuyoshi SUMI
角　和芳 *1

Abstract

For protecting marine environment, IMO(International Marine Organization) carried out the regulation of the CO_2 emissions from the ocean going vessel, some systems for reducing it have been designed and realized. Therefore, the simulation of the operation about the application of the system combined photovoltaic power generation and fuel cell that did not release air pollution gases to vessel was carried out. In the first place, the author examined the type of photovoltaic array and fuel cell. Secondly, the author designed electric power system combined the photovoltaic power generation and the fuel cell based on the present electric power system of the vessel. Finally, the simulation of the operation of the electric power system based on the navigation schedule of the vessel from January 1 in 2014 to December 31 in 2014 was carried out. From the result of the simulation of the operation, the reduction volume of fuel consumption of the diesel generator by the application of the electric power system was calculated.

***Keywords*:** Photovoltaic Power Generation, Fuel Cell, Diesel Engine of the Vessel, Greenhouse Gas
キーワード：太陽光発電，燃料電池，船舶のディーゼル機関，温室効果ガス

1. はじめに

現在，2014 年 4 月に策定された「新たなエネルギー基本計画」に基づき，温室効果ガス（GHG）の排出量削減や安定したエネルギーの供給を目的として，定置用燃料電池や燃料電池自動車の導入が拡大しつつある [(1)]．

海上を航行する船舶の推進装置と発電装置であるディーゼル機関からの温室効果ガスの削減対策に関して，海洋汚染の防止などを目的として，国連の中に設置されている国際海事機関によって，温室効果ガスである CO_2 排出量の削減対策が検討され，2011 年 7 月に，船舶が排出する有害物質による海洋汚染を防止するための国際条約である「海洋汚染防止条約」が採択され，2013 年 1 月に発効し，船舶からの CO_2 排出量規制が開始された [(2)]．

国際海事機関の船舶からの CO_2 排出量規制に対応するため，国内の造船所，舶用機器メーカ，海運会社によって抵抗の少ない推進効率の高い船型，効率の高い推進用プロペラ等を導入する方法が開発されている [(3)]．

一方，船舶からの CO_2 排出量削減のために燃料電池船は，ノルウエーにおいて，海上油田に資材などを運搬する船舶に燃料電池を搭載し，実証実験が行われ [(4)]，国内において，「燃料電池船については，導入に向けた実証事業の推進等について検討していく」とされ，普及が期待されている [(1)]．

燃料電池の船舶への導入について，筆者は，本研究の対象船舶である本校練習船「海技丸」（以下，本船）を用いて，低硫黄灯油を燃料とした本研究と同形の固体高分子形燃料電池（PEFC）を電源とし，2011 年 4 月から 1 年間の本船の運航スケジュールを基に，運転シミュレーションを行い，燃料電池の利用による燃料消費量の削減効果について検討を行った．その結果，ディーゼル発電機の代替として燃料電池を使用することによって，1 年間で 39.2%の燃料消費量の削減が期待できることが分かった [(5)]．また，燃料電池の燃料である水素の製造方法に関しては，石油，天然

*1 海技教育機構　海技大学校　機関科　教授（〒659-0026 芦屋市西蔵町 12-24　e-mail:sumi-k2rc@jmets.ac.jp）
（原稿受付：2016 年 8 月 27 日，受理日：2016 年 10 月 28 日）

ガスなどの化石燃料を触媒によって改質し製造する方法等があるが，太陽光発電の利用も有効であるとされている[1]．そこで，本研究では，今後，筆者が前述の文献（5）において考案したシステムと統合させて，燃料消費量の削減効果を向上させるための準備段階として，太陽電池と燃料電池を複合したシステム（以下，PV/FC システム）について検討を行った．

本研究の手順として，まず，本船に導入する太陽電池と燃料電池の選択を行い，本船の電源システムを基に，PV/FC システムを導入した電源システムの構成について検討を行った．次に，気象庁が観測した日射量データ，実測値を基にして作成した負荷電力モデル，及び 2014 年 1 月から 12 月の 1 年間の本船の運航スケジュールを使用し，PV/FC システムを導入した電源システムの運転シミュレーションを行い，PV/FC システムの利用による，本船のディーゼル発電機からの燃料消費量の削減効果について検証を行った．

2. シミュレーションの対象船舶

2.1　シミュレーションの対象船舶

運転シミュレーションの対象とした本船は全長 34.0m，幅 6.8m，総トン数は 157t ある．定格出力 500kW のディーゼル機関を搭載し，航海速力は約 11 ノットであり，日中は大阪湾や瀬戸内海において実習航海を行い，夜間は神戸港，香川県の小豆島，及び高松港等に停泊する．発電装置として，出力 150kVA のディーゼル発電機を搭載し，船内に電力を供給している．

2.2 太陽電池の選択と設置場所について

太陽電池には，単結晶シリコン型及び多結晶シリコン型等があるが，住宅用に広く使用され，変換効率が高い単結晶シリコン型を採用し，その変換効率を 0.15 とした[6]．太陽電池の設置場所は，船体用の図面である一般配置図を利用し，本船の操船に影響が少なく，太陽光の受け易さなどを考慮して操舵室の上部であるコンパスデッキと操舵室の前方，及び船尾部に，水平に設置することとした．また，太陽電池の設置面積は最大限に設置するとして 80m² とした．図 1 に太陽電池の設置場所を示す．

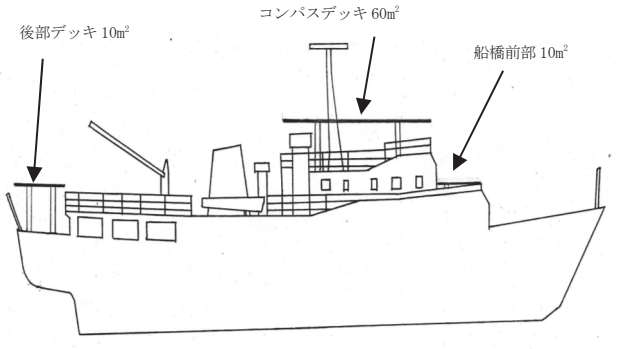

Fig.1 Setting place of solar panel
図 1　太陽電池の設置場所

2.3 燃料電池の選択について

燃料電池には，作動温度の違いから高温作動形と低温作動形ある．船上における運転や保守等を考慮に入れ，低温形を選択し，低温形の中でも低容量であり，家庭用として普及し，また，文献（5）において採用した燃料電池と同様の固体高分子形燃料電池を採用した[7]．

2.4 太陽電池と燃料電池を複合したシステムの構成

図 2 に運転シミュレーション用に考案した PV/FC システムを示す．PV/FC システムは，太陽電池，水素発生器，燃料電池，インバータ，及び変圧器等によって構成されている．太陽電池は，前述の様に，変換効率 0.15 の単結晶シリコン型太陽電池を本船の甲板上に 80m² 設置することとした．標準状態（日射強度：1000W/m²，表面温度：25℃）の太陽電池の出力は 12kW である．

PV/FC システムでは，太陽電池の発生電力によって，水素発生器に供給された海水を電気分解させて水素を発生し，その水素を，水素供給用ブロワを用いて，燃料電池に送る．ここで，水素発生器の変換効率を 0.90 とし，電気分解に必要な海水は，本船の海水サービスポンプの系統から供給することとした[8]．

次に，スタック（燃料電池本体）の燃料極（アノード）に供給された水素と空気極（カソード）に送られた空気中の酸素の反応によって電力が発生する．発生した電力は，インバータによって交流に変換され，変圧器によって昇圧され，船内各電力系統に供給される．ここで，燃料電池の定格出力は 5.2kW であり，インバータの効率を 0.96[9]，変圧器の効率を 0.98 とした[10]．

スタックの空気極にはブロワから空気を送り，スタックは発電に伴い，80℃から 100℃に発熱するため，スタックの冷却板を，本船のボイラの蒸気を熱源として精製した純水によって冷却することとした．また，PV/FC システムからの供給電力の不足分は，本船のディーゼル発電機（出力:150kVA）から供給することとした．

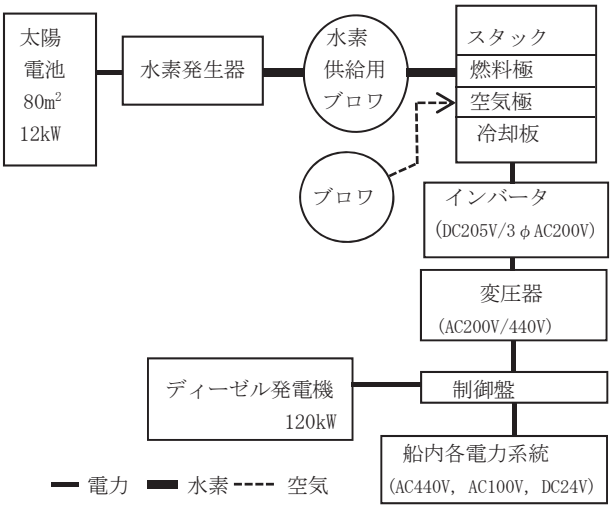

Fig.2 Construction of PV/FC system
図 2　PV/FC システム

尚，第1章にて述べた様に，筆者が，今後，文献（5）において考案したシステムと統合する場合，図2の水素供給ブロワから文献（5）のシステムの燃料電池へ水素を送り，ディーゼル発電機は使用せず，図2より大型の燃料電池によって電力を供給することを想定している．図3に統合したシステムの概要図を示す．

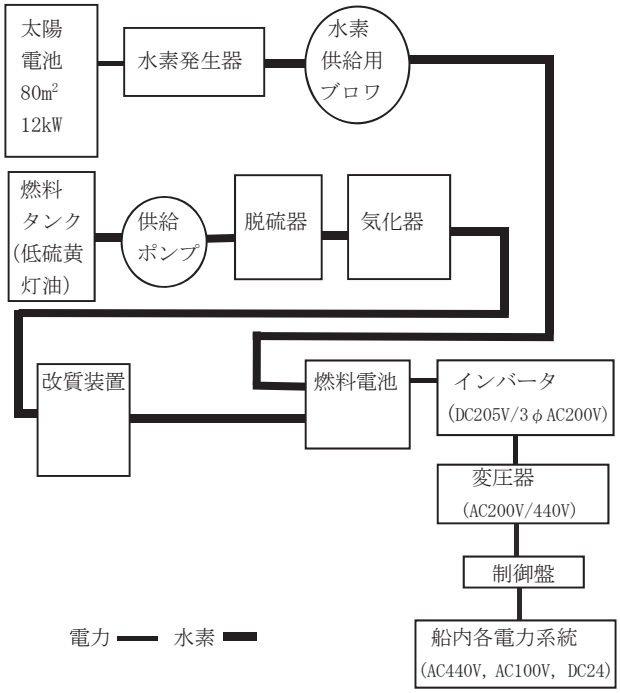

Fig.3 Outline drawing of integrated system
図3　統合したシステムの概要図

3. 運転シミュレーション

3.1 日射量データ

運転シミュレーションに用いる日射量(全天日射量)は，本船の運航状況に合わせ，2014年1月から12月まで，気象庁が観測した大阪（北緯34.7°，東経135.5°），高松（北緯34.3°，東経134.1°），及び松山（北緯33.8°，東経132.8°）のデータを用いた[11]．例えば，本船が神戸港から小豆島まで航海を行う時，大阪と高松の中間の海域を航行する時間までは，大阪のデータを用い，大阪と高松の中間の海域を通過後は，高松のデータを用いた．また，神戸港に停泊する時は，大阪のデータを用いた．図4に本船が航海を行い，停泊した日（75日，以下，航海日とする）の日射量と本船が24時間，港に停泊した日（278日，以下，停泊日とする）の日射量を示す．

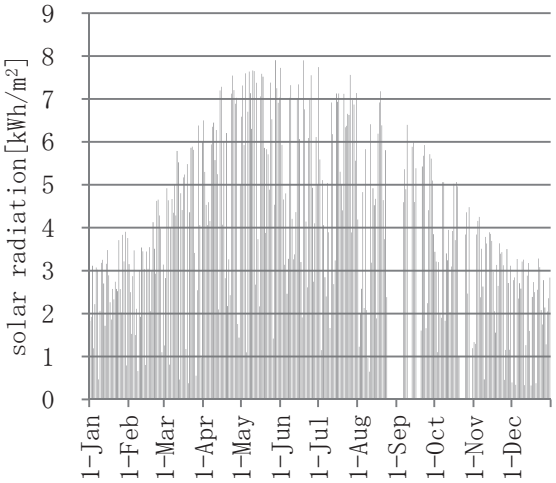

Fig.4 Solar radiation of navigation day and anchor day
図4　航海日及び停泊日の日射量

3.2 負荷電力モデル

運転シミュレーションに用いる航海中（9時から21時）と停泊中（0時から24時）の負荷電力モデルを，毎正時の実測値を基に，電気機器の主要目から連続運転及び断続運転される負荷の電力を考慮に入れ作成した．図5に航海中の負荷電力モデル，図6に停泊中の負荷電力モデルを示す．負荷電力は季節や気象海象によって変化するが，作成した負荷電力モデルを運転シミュレーションに用いた．ここで，本船が日中，航海を行い，その後，夜間は停泊する航海日は，航海を行う時間帯は図5から，停泊する時間帯は図6から電力を求めることにする．

航海中の負荷電力は最大 36.0kW，最少 21.0kW，平均 28.5kW，停泊中の負荷は最大 26.0kW，最少 15.0kW，平均 17.3kW である．

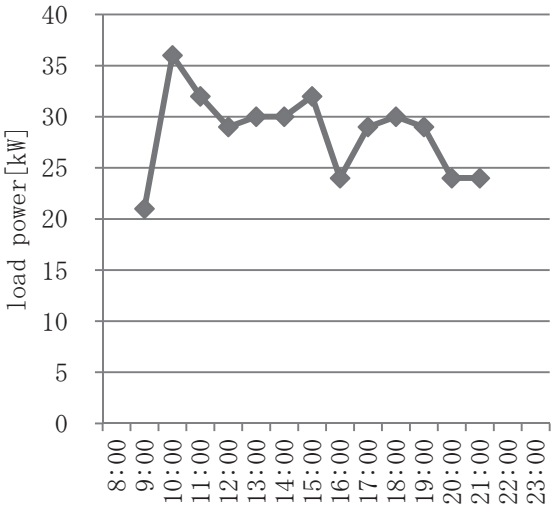

Fig.5 Load power model of navigation day
図5　航海中の負荷電力モデル

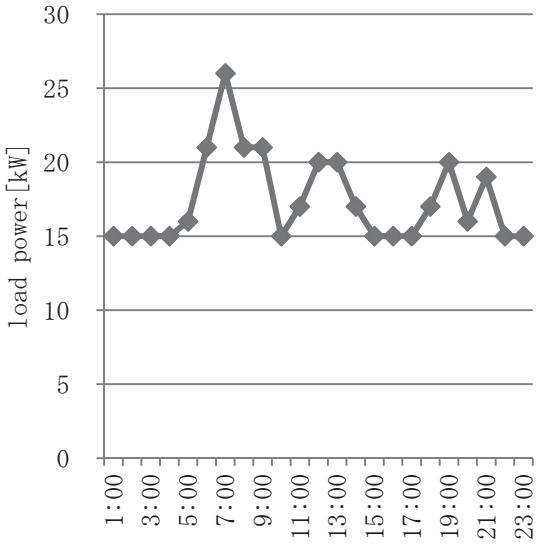

Fig.6 Load power model of anchor day
図 6　停泊中の負荷電力モデル

3.3 負荷電力量

3.3.1 太陽電池の発電電力量

本船の甲板上に設置された太陽電池の発電電力量は次式によって求めた [6]．

$$E_A = H_A \cdot K \cdot A \cdot \eta_S \quad (1)$$

ここで，E_A：発電電力量[kWh]

H_A：日射量[kWh/m^2]

K：太陽電池出力補正係数.

A：太陽電池面積[m^2]，本論文では 80m^2 とした.

η_S：太陽電池の変換効率，本論文では 0.15 とした.

太陽電池出力補正係数は，太陽電池の表面の汚れ，太陽電池モジュールを結合しアレイ化したための出力低下，及び表面の温度上昇による出力低下などを補正する係数である．ここで，本論文では，太陽電池出力補正係数を，日射量観測地の月平均温度を基に次式によって求めた [12]．

$$K = K_D \cdot K_A \cdot K_M \cdot K_T \quad (2)$$

ここで，K：太陽電池出力補正係数

K_D：経時変化補正係数，本論文では，0.99 とした.

K_A：アレイ回路補正係数，本論文では，0.98 とした.

K_M：アレイ負荷整合補正係数，本論文では，0.90 とした.

K_T：温度補正係数

温度補正係数 K_T は，次式によって求めた.

$$K_T = 1 - \alpha_{Pmax} \cdot (T_{cm} - T_S) \quad (3)$$

ここで，K_T：温度補正係数

α_{Pmax}：最大出力の温度補正係数，本論文では，単結晶シリコン型であるため，0.0037 とした.

T_{cm}：月平均セル温度（日射量観測地の月平均気温＋15℃）[℃]

T_S：標準状態のセル温度[℃]，本論文では，25℃とした.

3.3.2 水素発生器の水素発生量

PV/FC システムでは，水素発生器（海水電解装置）を用いて，太陽電池出力によって海水を電気分解し，水素を発生させる．ここで，電解液は海水（海水には 3%程度の塩化ナトリウム[NaCl]を含む．）である．水素発生器の陽極及び陰極における化学反応式は下記によって示され，陰極において，電解液中の水（H_20）が電子（e^-）を得て水素が発生する [13]．

陽極　$2Cl^- \rightarrow Cl^2 + 2e^-$

陰極　$2H_20 + 2e^- \rightarrow H^2 + 2OH^-$

ここで，化学反応を進めるための電圧は，1.23V（理論電解電圧）とする．陰極の反応式から 1mol の水素を発生させるために，電子は 2mol 必要である。ファラデー定数から電子 1mol が持つ電気量は 96500C であるため，1mol の水素が発生するために必要な電力量は

1.23V×2×96500C＝237390J＝0.0659kWh　(4)

になる．したがって，水素発生器の水素発生量を次式によって求めた.

$$Q_{HG} = \frac{E_A}{0.0659} \cdot \eta_{HG} \quad (5)$$

ここで，Q_{HG}：水素発生器の水素発生量[mol]

E_A：発電電力量[kWh]

η_{HG}：水素発生器の変換効率，本論文では，0.90 とした.

3.3.3 燃料電池の発電電力量

太陽電池の発電電力量は日射量によって変化するが，太陽電池の発電時，水素発生器において発生した水素は瞬時に水素供給用ブロワによって，スタック（燃料電池本体）の燃料極（アノード）に送られる．したがって、太陽電池の発電電力の変化にともなって，燃料電池の出力は変化する．スタックには発電反応に使用される燃料よりも多く水素を供給する必要があるため，スタックに供給された水素のうち，80%が発電に使用され，残りの 20%は空気極（カソード）から排気されるとして，発電反応に使用される水素量を次式によって求めた [7]．

$$Q_{FC} = Q_{HG} \cdot U_F \quad (6)$$

ここで，Q_{FC}：発電反応に使用される水素量[mol]

Q_{HG}：水素発生器の水素発生量[mol]

U_F：燃料利用率，本論文では，0.80 とした.

次に，太陽電池発電時の PV/FC システムの送電端電力量を，以下の手順で求めた.

まず，単セルあたりの電圧 V_C を次の様に求めた．スタックの出力が P_S の時，スタックの電圧 V_S が 205V として，スタックの電流 I_S は次式によって求められる.

$$I_S = \frac{P_S \times 1000}{V_S} \quad (7)$$

ここで，I_S：スタックの電流[A]
P_S：スタックの出力[kW]
V_S：スタックの電圧[V]

スタックの電流 I_S と単セルの有効電極面積 A_C から電流密度 i_D は次式によって求められる．

$$i_D = \frac{I_S \times 1000}{A_C} \quad (8)$$

ここで，i_D：電流密度[mA/cm^2]
I_S：スタックの電流[A]
A_C：有効電極面積[cm^2]，本論文では
225 cm^2（15cm 平方）とした．

燃料電池の電流密度 i_D と単セルあたりの電圧 V_C の関係を示す電圧-電流特性を文献(7)を参照として作成した．電圧-電流特性は次式になり，電流密度 i_D が変化した時の単セルあたりの電圧 V_C が求められる．

$$V_C = \frac{-0.33 i_D + 782}{1000} \quad (9)$$

ここで，V_C：単セルあたりの電圧[V]
i_D：電流密度[mA/cm^2]

また，発電時の単セルの積層数 N_C は次式によって求められる．

$$N_C = \frac{V_S}{V_C} \quad (10)$$

ここで，N_C：発電時の単セルの積層数
V_C：単セルあたりの電圧[V]
V_S：スタックの電圧[V]

スタックにおける発電反応に必要な水素量 Q_H は，文献(7)から 1 時間あたり 1 kg-mol の水素が反応すると 53603A の電流が流れるため，次式によって求められる．

$$Q_H = \frac{I_S \cdot N_C}{53603} \quad (11)$$

ここで，Q_H：発電反応に必要な水素量[kg-mol/h]
I_S：スタックの電流[A]
N_C：発電時の単セルの積層数

(7)式から(11)式によって，発電反応に必要な水素量 Q_H とスタックの出力 P_S は一次関数で示され，燃料電池の運転時間を考慮したスタックの出力電力量と発電反応に使用される水素量の関係は次式になる．次式を用いて，太陽電池発電時のスタックの出力電力量を求めた．

$$E_S = 0.039 Q_{FC} + 0.105 h_S \quad (12)$$

ここで，E_S：スタックの出力電力量[kWh]
Q_{FC}：発電反応に使用される水素量[mol]
h_S：燃料電池の運転時間[h]

最後に，太陽電池発電の PV/FC システムの送電端電力量を，次式によって求めた．

$$E_{PV} = E_S \cdot \eta_{INV} \cdot \eta_T \quad (13)$$

ここで，E_{PV}：PV/FC システムの送電端電力量[kWh]
E_S：スタックの出力電力量[kWh]
η_{INV}：インバータ効率，本論文では，
0.96 とした．
η_T：変圧器の効率，本論文では，0.98 とした．

4. 運転シミュレーション結果

図 5 及び図 6 に示した負荷電力モデルを基に，本船が航海を行い停泊した航海日（75 日），及び 24 時間停泊した停泊日（278 日）ごとに負荷電力量を求めた．停泊日の負荷電力量は図 6 を用い，航海日の負荷電力量は，本船が日中，航海した時間帯は図 5 から，夜間，停泊した時間帯は図 6 から求め，それらを合計して航海日の負荷電力量を求めた．航海日の 1 時間あたりの負荷電力量は平均 20.7kWh，停泊日の 1 時間あたりの負荷電力量は平均 17.4kWh になった．ここで，図 2 に示す水素供給用ブロワ，空気供給用ブロアなど，燃料電池用補機類の消費電力を 0.2kW と推算し，負荷電力量を求めた．

次に，日射量データと(1)式を基に太陽電池の発電電力量を計算した．図 7 に航海日及び停泊日の発電電力量を示す．航海日の発電電力量は最大 78.7kWh（6 月 19 日，神戸港から泉州港へ航海，天候:晴れ），最少 4.6kWh（10 月 22 日，栗島から今治港へ航海，天候:雨のち曇り），平均 40.6kWh であった．停泊日の発電電力量は最大 79.7kWh（5 月 28 日，神戸港停泊，天候:晴れ），最少 3.4kWh（12 月 16 日，神戸港停泊，天候:雨），平均 40.0kWh であった．

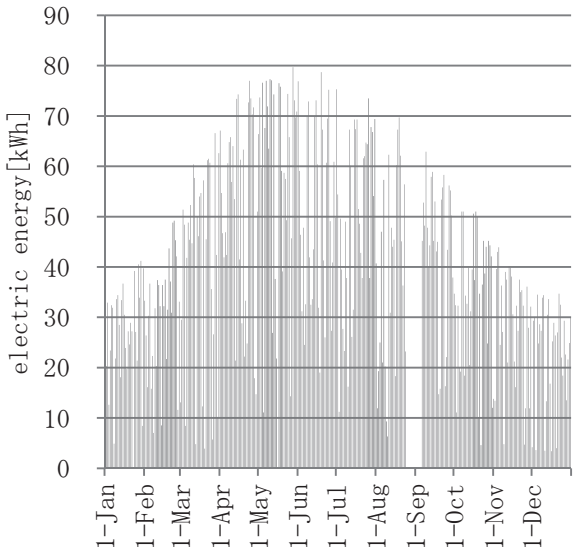

Fig.7 Electric energy of navigation day and anchor day
図 7　航海日及び停泊日の太陽電池の発電電力量

PV/FC システムの送電端電力量を(12)式及び(13)式を用いて計算した．航海日の送電端電力量は最大 33.1kWh（6 月 19 日），最少 3.0kWh（10 月 22 日），平均 17.5kWh であった．停泊日の発電電力量は最大 33.3kWh（5 月 28 日），最少 2.4kWh（12 月 16 日），平均 17.3kWh であった．PV/FC

システムの送電端電力量と負荷電力量から，PV/FC システムから負荷への電力量の供給比率を求めた．航海日の電力量の供給比率は最大 6.9%（6 月 19 日），最少 0.6%（10 月 22 日），平均 3.5%であった．停泊日の電力量の供給比率は最大 8.0%（5 月 28 日），最少 0.6%（12 月 16 日），平均 4.1%であった．

5. 燃料消費量

PV/FC システムを導入する場合と PV/FC システムを導入しない場合の，ディーゼル発電機の燃料消費量を以下の手順で計算した．ディーゼル発電機の燃料消費量は，発電機を駆動するディーゼル機関出力と燃料消費量は比例関係にあるため [14]，メーカが作成した負荷試験成績表から，ディーゼル機関出力と燃料消費量の特性を作成し計算した．ここで，ディーゼル機関出力は，次式によって求めた．

$$P_D = \frac{P_G}{\eta_G} \tag{14}$$

ここで，P_D：ディーゼル機関出力［kW］
P_G：発電機出力［kW］
η_G：発電機効率，本研究では 0.8 とする．

表 1 にディーゼル発電機の航海日及び停泊日における 1 日あたりの燃料消費量を示す．ここで，表 1 の PV/FC システムを導入しない場合の停泊日の値は，同じ負荷電力モデルを用いるため，等しくなった．表 1 から PV/FC システムを導入することによって，ディーゼル発電機の燃料消費量は航海日において平均 2.3%，停泊日において平均 2.6%の削減が期待できる．

Table 1 The volume of fuel consumption of diesel generator
表 1 ディーゼル発電機の燃料消費量

		PV/FC システム無し（1 日あたり）	PV/FC システム有り（1 日あたり）
航海日	最大[kg]	187.4	183.9
	最小[kg]	157.7	150.4
	平均[kg]	176.5	172.4
停泊日	最大[kg]	155.2	155.1
	最小[kg]	155.2	146.8
	平均[kg]	155.2	151.1

6. まとめ

本研究では，燃料電池の船舶への導入について，筆者が文献（5）において考案したシステムと統合させて，燃料消費量の削減効果を向上させるための準備段階として，太陽電池と燃料電池を複合した PV/FC システムについて，運転シミュレーションを行い，本船のディーゼル発電機からの燃料消費量の削減効果について検証を行った．その結果，PV/FC システムから，航海日は，負荷電力量の平均 3.5%，停泊日は，平均 4.1%を供給することができ，ディーゼル発電機の燃料消費量は，航海日において平均 2.3%，停泊日は平均 2.6%の削減が期待できることが分かった．また，図 3 に概要図を示した様に文献（5）において考案したシステムと統合させた場合，PV/FC システムから同程度の電力供給比率と燃料消費量の削減効果があると見込まれる．

ここで，太陽電池の船舶への導入については，外航の大型自動車運搬船に 40ｋW の太陽電池が搭載され，船内のディーゼル発電機と安定した運転が行われたが，太陽電池の出力が時刻や天候によって変化するため，大容量（約 100kWh）の二次電池を使用し，太陽電池の出力を充放電する必要があると報告されている [15]．本研究において検討した PV/FC システムは，燃料電池の効率を考慮するため，太陽電池の出力を直接，負荷に供給するより効率は低下するが，文献（5）において考案したシステムと統合させて大型船舶へ導入した場合，大容量の二次電池やパワーコンディショナーは不要となり，設備コストや電力供給の安定性から有効な手段になると考える．さらに，燃料電池の排熱によって蒸気を発生させて船内の給湯等に利用すれば，燃料電池発電の効率を向上することができる．

燃料電池を船舶に導入するには，燃料電池発電に必要な機器の設置場所，構造，及び配管等に課題があると考えるが，課題の解決策を考察するとともに，提案した PV/FC システムの大型船舶への導入についても検討して行きたい．

参考文献

1)水素・燃料電池戦略協議会，水素・燃料電池戦力ロードマップ，1-5，26-27（2014），資源エネルギー庁
2)松本友宏，NO_x，SO_x，EEDI の段階的規制強化に関する IMO/MEPEC の審議動向 - NO_x3 次規制開始が「2016 年」で決着するまでの交渉過程を中心に，日本マリンエンジニアリング学会誌，Vol.49，No.6（2014），42-47
3)国土交通省海事局安全・環境政策課船舶産業課，船舶からの CO_2 削減技術開発支援事業の評価について，（2013），国土交通省
4)三浦佳範，LNG 燃料船と DNV の取り組み - 北欧での実例と今後の動向，日本マリンエンジニアリング学会誌，Vol.47，No.6（2012），12-17
5)Kazuyoshi Sumi，Basic study on the application of the fuel cell system operated by kerosene to vessel，ABSTRACT LIST-WORLD RENEWABLE ENERGY CONGRESS 13，（2014），82
6)太陽光発電懇話会，太陽光発電システムの設計と施工-改訂 3 版，1-17，72-73（2006），オーム社
7)上松宏吉，燃料電池発電システムと熱計算，18-20，50-60，93-102（2000），オーム社
8)四国総合研究所ホームページ，
http://www.ssken.co.jp/topics/2002_02.htm
9）西川省吾，ニッケル水素蓄電池の住宅用 PV システムへの適用に関する基礎検討，日本太陽エネルギー学会誌，Vol.33，No.4（2007），41-47
10)西川佳男，因幡富昭，電気・電子工学入門，43-56(1992)，理工学社
11)日本気象協会ホームページ，http://www.data.jma.go.jp
12)黒川浩助，若松清司，太陽光発電システム設計ガイドブック，90-92（1995），オーム社
13)野村祐次郎，辰巳敬，本間善男，新化学，251-258（2009），数研出版社
14)長谷川静音，舶用ディーゼル機関教範，90-92(1999)，成山堂
15)高橋寿和，太陽エネルギーの利用 - 二次電池との組合せによるハイブリッド給電システムの開発，日本マリンエンジニアリング学会誌，Vol.47，No.4（2012），85-9