

外航船舶に設置した太陽電池の発電電力量の推算

Estimation of Electric Energy Generated from Photovoltaic Array
Installed on Ocean Going Vessel

角 和 芳 *¹
Kazuyoshi SUMI

西 川 榮 一 *²
Eiichi NISHIKAWA

山 本 茂 広 *³
Shigehiro YAMAMOTO

橋 本 武 *⁴
Takeshi HASHIMOTO

Abstract

For the aim of reducing air pollution gases such as CO₂, NO_x, and SO_x from diesel engines of vessels, the authors have been examining the application of wind energy conversion system and photovoltaic energy conversion system to marine electric power generation system of vessels. In case of discussing design of the marine electric power generation system with photovoltaic energy conversion system, the global solar radiation data will be required on the route of the vessel. Making the global solar radiation data on land are completed, it is easy to use them for the purpose of designing the photovoltaic energy conversion system. On the other hand, the global solar radiation data at sea don't exist, it is difficult to calculate the photovoltaic energy from the photovoltaic array on the deck of the vessel.

In this paper, the method of calculating the global solar radiation on the route of the vessel was considered from the data of noon latitude, longitude, weather on the vessel. By using the proposed method, the amounts of the global solar radiation on the main routes; North American route, Australian route, European route were calculated. From the results, the photovoltaic energy from photovoltaic array on the vessels navigating the main routes was calculated. The proposed method of calculating the global solar radiation on the route of the vessel will be available to design the marine electric power generation system with the photovoltaic energy conversion system.

キーワード: 外航船舶, 太陽電池, 発電電力量推算, 日射量推算, 大気汚染物質の削減

Key Word: Ocean Going Vessel, Photovoltaic Array, Estimation of Electric Energy, Estimation of global solar radiation, Reducing Air Pollution Gases

1. はじめに

近年, 地球温暖化問題などエネルギー・環境問題に対する社会的関心が高まるなか, 海上を航行する船舶についても, そのディーゼル機関から排出される CO₂, NO_x, SO_x など, 大気汚染物質の排出量の削減が問題となっている。CO₂ 排出量の削減対策として, 機関の燃料消費率の低減を目的としたプロペラボスキャップフィン(PBCF)による推進器の改善, マイクロバブルによる船体摩擦抵抗の低減, 液化天然ガス(LNG), 水素等を燃料とした機関の開発が行われている¹⁾。また, NO_x 排出量の削減には, 燃料噴射時期の遅延, 水エマルジョン燃料の使用など, 燃焼ガス温度を低下させる方法が検討され, SO_x 排出量の削減には低硫黄燃料油や排気ガス浄化装置の使用などが検討されているが, それぞれの対策には解決しなければならない問題点も残されている²⁾。

以上の様に, 船舶のディーゼル機関から排出される大気汚染物質の排出量削減の手段が検討されているなか, 筆者らは風力発電及び太陽光発電システムの船舶電源への導入について検討を行ってきた^{3)~6)}。

陸上のある地域に太陽光発電システムを導入する際, あらかじめ作成された日射量データ⁷⁾を使用し, 発電電力量を推算する事ができる。陸上と同様, 海上を航行する船舶に太陽光発電システムの導入を検討する際, 航行海域における日射量データが必要である。海上の日射量については, 気象衛星の画像を用いて推定され,

日射量の分布図が作成されている⁸⁾。それを用いて島々など海上の決まった地点のある期間の日射量の場合ならば推算できるが, 時間の経過と共に海上を移動する船舶の甲板上の日射量を推算するには手間がかかり困難である。さらに, 日射量計を船舶に設置し観測すればよいが, そのためにはコストとある程度の観測期間が必要になる。そこで, 本稿では実際に海上を航行する船舶のログブックに記録されている正午位置, 天候など, 既に存在する入手可能な限られたデータから日射量を推算する簡便な方法を開発し, その方法による誤差を検証した。そして, その推算方法を用いて対象船舶の日射量を計算し, 航路及び季節別の変化傾向を求めた。最後にその船舶の甲板上に太陽電池を設置した場合の発電電力量を計算し, 船舶に太陽光発電システムの導入を検討する際の発電電力量の基礎的データを作成した。

2. 日射量推算方法

2.1 日射量推算の手順

本稿において開発した日射量推算の手順を図1に示し, その概要について述べる。まず, 対象船舶の正午緯度, 赤緯, 大気透過率から日中は快晴(雲量の割合:0)が続くと仮定した航路上での日積算日射量の理論上の最大値を求める。ここで, 大気透過率は快晴時に定義され, 空気分子, エアロゾル及び水蒸気によって変化し, 実際の大气では0.6~0.8の範囲であるが⁹⁾。本手法では最大値を求める事が目的であるので, 0.8と一定にする。なお, 本稿で用いる日射量は, 太陽からの直達日射及び散乱日射を合わせた, 水平面全日射量を示す。

次に, 求めた日積算日射量の理論最大値に正午の天候によって決められた天候係数(2.3節にて詳しく示す)を掛けて日積算日射量の推算値とする。この天候係数は神戸商船大学(現・神戸大学深江キャンパス)において観測した正午の各天候(雲量の割合)について, 日積算日射量の理論最大値に対する日射量計を用いて計測

*¹ 海技大学校機関科教室 助教授
(〒659-0026 芦屋市西蔵町12-24)
e-mail: sumi@mail.mtc.ac.jp

*² 神戸大学海事科学部 教授

*³ 神戸大学海事科学部 助教授

*⁴ 神戸商船大学名誉教授

(原稿受付: 2003年10月20日)

した実測値の比率を計算し求めた。ここで、天候の分別は船舶での記録方法¹⁰⁾に合わせ、表1に示す様に、全天が隙間無く雲に覆われている時を1とした雲量の割合を用いて行った。

すなわち、この方法によって、航海中の正午の緯度と天候の記録だけから簡便にその日の日積算日射量を推算する事ができる。

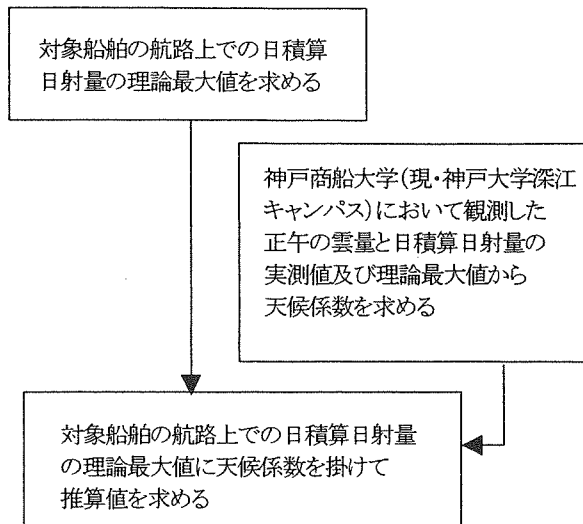


Fig.1 Method of estimation of global solar radiation
図1 開発した日射量推算の手順

Table.1 Relation between cloudiness and weather
表1 雲量の割合と天候の関係

雲量の割合	天候
0 以上～0.20 未満	b(快晴)
0.20 以上～0.85 未満	bc(晴)
0.85 以上～0.95 未満	c(曇り)
0.95 以上～1.00 以下	o(本曇り), r(雨), f(霧)

2.2 日積算日射量

まず、日射量瞬時値の快晴時の理論最大値は次式⁹⁾を用いて計算した。

$$H = I_0 \sin h A^{\cos h} + \frac{I_0 \sin h (1 - A^{\cos h})}{2(1 - 1.4 \ln A)} \quad (1)$$

ここで、

$$\sin h = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega \quad (2)$$

ただし、 H : 日射量瞬時値[kW/m²]

I_0 : 大気外日射強度[kW/m²],

本研究では $I_0 = 1.38 \text{ kW/m}^2$ とする。

h : 太陽高度

A : 大気透過率,

本研究では $A = 0.8$ とする。

ϕ : 緯度

δ : 赤緯

ω : 太陽の時角

また、赤緯は次式を用いて計算した。

$$\delta = 23.45 \sin \frac{360(284 + n)}{365} \quad (3)$$

ただし、 δ : 赤緯

n : 元日を1とした年間の日付の通し番号

そして、(1)式によって日出から日没までの日射量瞬時値を求め、それらを積算し、日中は晴天が続くと仮定した日積算日射量の理論最大値を求めた。航路上の日積算日射量の理論最大値を求める場合、船舶は移動するので緯度が変化するが、日中の移動距離は速力 23 ノット、日出から日没までの可照時間が 12 時間としても約 500km であるので、正午位置を基準として問題ないとする。

2.3 天候係数

2001年8月から翌年1月までのうち153日間、神戸商船大学(現・神戸大学深江キャンパス)において観測したスカイカメラの画像を用いて正午の雲量の割合を0.05単位で目測した。正午の雲量の割合と、その日の日積算日射量の理論最大値及び日射量計を用いて計測した実測値の関係を調べてみると、正午の雲量の割合と、日積算日射量の理論最大値に対する実測値の比率には図2に示す様に相関関係がある事が分かった。ここで、図2中の直線は最小二乗法を用いて書いた直線である。次に、表1を基にして正午の雲量の割合を天候に分別し、天候毎に日積算日射量の理論最大値に対する実測値の比率の平均値を求めた。本稿ではその平均値を天候係数と呼び、次式を用いて表される。各天候についての天候係数を表2に示す。

$$\text{天候係数} = \frac{\text{日積算日射量の実測値}[\text{kWh/m}^2]}{\text{日積算日射量の理論最大値}[\text{kWh/m}^2]} \quad (4)$$

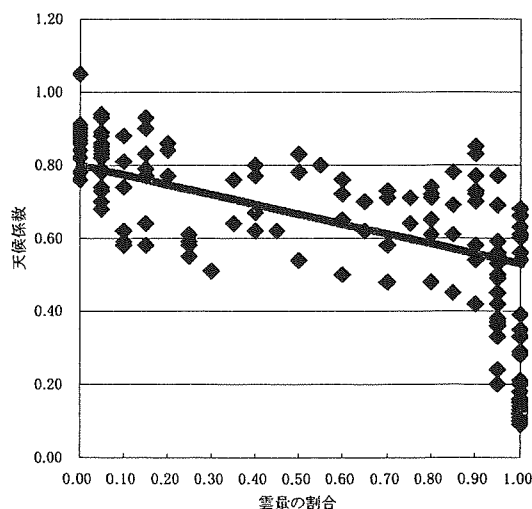


Fig.2 Relation between cloudiness and weather coefficient
図2 雲量の割合と日積算日射量の理論値に対する実測値の比率

Table.2 Weather coefficient
表2 天候係数

天候	天候係数
b	0.785
bc	0.622
c	0.502
o, r, f	0.295

3. 陸上における日射量推算結果

開発した方法によって、気象庁の気象データを基に2001年の1年間、潮岬と那覇における日積算日射量の推算値を計算し、実測値との比較を行った結果を表3と表4に示す。

Table.3 Estimated and actual measurement of global solar radiation in Shiono-misaki

表3 潮岬における日積算日射量の推算値と実測値

月別合計値	実測値 [kWh/m ²]	推算値 [kWh/m ²]	誤差割合[%]
1月	88.3	70.9	-19.6
2月	99.5	80.7	-18.9
3月	138.6	121.7	-12.2
4月	155.7	140.9	-9.5
5月	155.4	151.9	-2.3
6月	132.1	145.3	10.0
7月	192.4	189.4	-1.6
8月	163.3	153.0	-6.3
9月	121.1	120.9	-0.1
10月	115.0	107.1	-6.8
11月	95.4	77.4	-18.8
12月	87.3	66.5	-23.8
1日の平均値	4.24	3.92	-7.5

Table.4 Estimated and actual measurement of global solar radiation in Naha

表4 那覇における日積算日射量の推算値と実測値

月別合計値	実測値 [kWh/m ²]	推算値 [kWh/m ²]	誤差割合[%]
1月	81.6	82.5	1.1
2月	85.6	92.0	7.5
3月	115.6	128.4	11.1
4月	128.6	140.4	9.1
5月	117.7	140.5	19.4
6月	162.6	155.1	-4.6
7月	189.2	181.1	-4.3
8月	173.1	164.9	-4.7
9月	110.7	118.2	6.7
10月	127.4	115.9	-9.0
11月	109.0	93.4	-14.3
12月	79.0	77.4	-2.0
1日の平均値	4.06	4.08	0.5

1日あたりの平均値は、潮岬の場合、実測値 4.24kWh/m²に対して推算値が 3.92kWh/m²、誤差が-0.32kWh/m²であり、那覇の場合、実測値 4.06kWh/m²に対して推算値が 4.08kWh/m²、誤差が 0.02kWh/m²になった。誤差の標準偏差は、潮岬の場合 1.31kWh/m²、那覇の場合 1.16kWh/m²であり、1日あたりの推算値には変動がある。原因として、正午の天候とその他の時刻の天候に相違があ

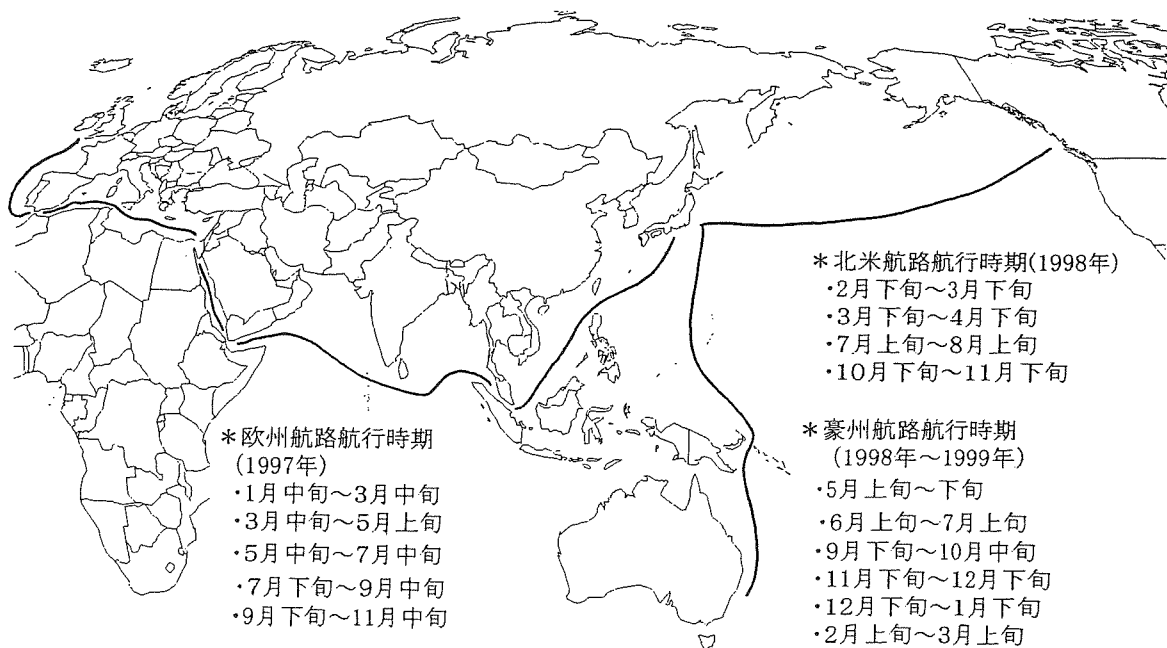


Fig.3 Route and period of navigation

図3 航路及び航行時期

る時など誤差が大きくなると考える。

上述の様に 1 日あたりの推算値には変動があるが、月別合計値で比較すると、誤差割合は潮岬の場合 0.1~23.8%, 那覇の場合 2.0~19.4% になり、本稿で開発した推算方法には、それくらいの誤差を含む可能性があると考えられる。

4. 航路上の日射量推算結果

4.1 データ収集の対象航路と船舶

開発した方法を用いて北米航路、豪州航路、及び欧州航路を航行する船舶を対象にして日射量を推算した。図 3 に対象船舶の大きな航路及び航行時期を示す。北米航路及び豪州航路を航行する石炭専用船(全長 239.8m, 幅 43.0m, 総トン数 58103t)は、日本から北米西岸及び日本から豪州東岸を航海速度 14.5 ノットで約 1 ヶ月間かけて往復航海している。一方、欧州航路を航行するコンテナ船(全長 299.9m, 幅 37.1m, 総トン数 60117t)は、日本からスエズ運河を経て欧州西岸を、航海速度 22.8 ノットで約 2 ヶ月間かけて往復航海している。

対象船舶のログブックに記録されている正午の緯度、経度、天候、気圧、気温などのデータを収集した。ここで、正午の天候は雲量の目視によって表 1 に示す様に分類されて記録されている。データの収集日の合計は、北米航路は 106 日、豪州航路は 145 日、欧州航路は 210 日であった。

4.2 各航路の正午に観測された天候の割合

対象とした北米航路、豪州航路、及び欧州航路を航行する船舶において、正午に観測された天候の全観測日に対する割合を表 5 に示す。北米航路では天候 o の日が多く、他の天候、f の日を含めると雲量の割合が 1.00 の日が全観測日の 51.9% を占めていた。豪州航路では天候 c の日、次に bc の日が多く、天候 o, r, f の日は全観測日の 6.9% であった。欧州航路では天候 bc の日が全観測日の 59% であり、天候 o, r, f の日は全観測日の 16.2% であった。

Table.5 Ratio of observed weather at noon
表 5 正午に観測された各天候の割合

	bc	c	o	r	f
北米航路	17.9	30.2	41.5	3.8	6.6
豪州航路	40.0	53.1	5.5	1.4	—
欧州航路	59.0	24.8	15.2	0.5	0.5

4.3 日射量推算結果

開発した推算方法を用いて、北米航路、豪州航路、及び欧州航路を航行する船舶の日積算日射量の推算値を計算した。各航路上での日積算日射量の推算値を図 4 から図 6 に示す。計算の結果、日積算日射量は北米航路では平均 2.53kWh/m²、豪州航路では平均 4.18kWh/m²、欧州航路では平均 4.45kWh/m² になった。航路別に比較すると、欧州航路が最も多く、次に豪州航路が多かった。原因として、欧州航路では、天候 bc の日の割合が多く、天候 r 及び f の日の割合が少なく、更に他の航路と比べ低緯度の海域を航行し

た為であると考えられる。また、季節別々に比較すると、当然ながら各航路とも冬季よりも夏季の方が多く、特に北米航路では冬季に天候 o, r, f の日の割合が多かったため、その傾向が著しい事が分かった。

開発した推算方法において、大気透過率と天候係数を陸上と同じ値を使用する事は、大気透過率に関係する大気中の空気分子、水蒸気、及びエアロゾルの状態や、天候係数に関係する雲の状態は陸上と海上では多少の相違があると考えられる。したがって、実測値と推算値の誤差がどの程度あるか、今後調査及び検討する必要がある。

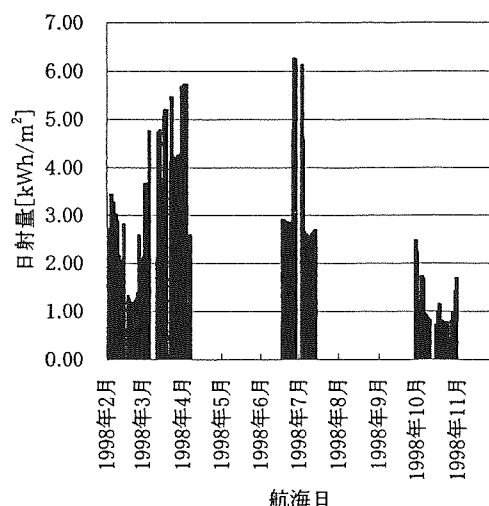


Fig.4 Estimated measurement of global solar radiation of North American Route

図 4 北米航路上の日積算日射量の推算値

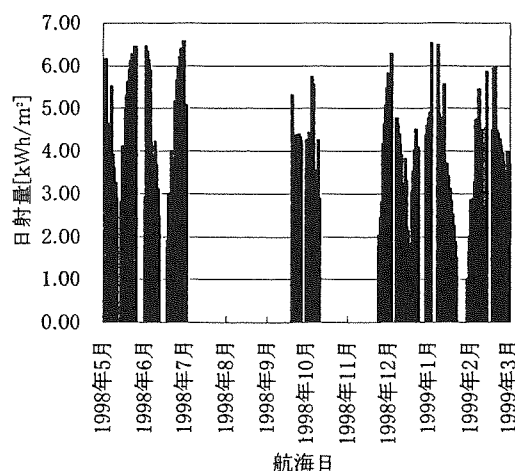


Fig.5 Estimated measurement of global solar radiation of Australian Route

図 5 豪州航路上の日積算日射量の推算値

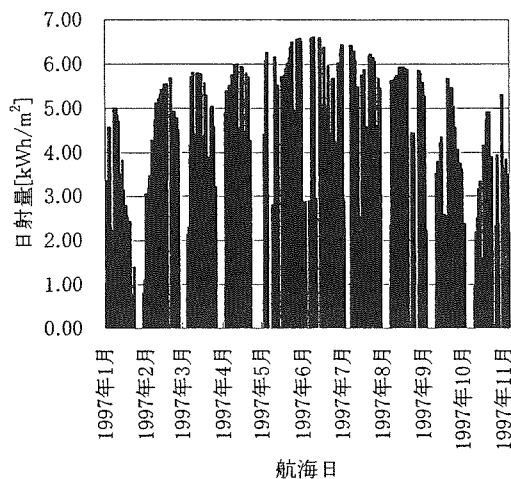


Fig.6 Estimated measurement of global solar radiation of European Route

図6 欧州航路上の日積算日射量の推算値

5. 太陽光発電電力量の推算結果

前章で求めた日射量推算値を基に対象船舶の甲板上に太陽電池アレイを設置した場合の 1m^2 あたりの発電電力量を次式によって計算した⁷⁾。

$$E_p = H_A \cdot \eta_s \cdot K \quad (5)$$

ただし、 E_p : 発電電力量[kWh]

H_A : 日積算日射量の推算値[kWh/m²]

η_s : 太陽電池アレイの変換効率、

本研究では多結晶シリコンを用いると仮定し、

$\eta_s = 0.13$ とする。

K : 総合設計係数、本研究では $K = 0.90$ とする。

計算の結果、1日あたりの発電電力量は、北米航路を航行する船舶では、平均0.30kWh、豪州航路を航行する船舶では、平均0.50kWh、欧州航路を航行する船舶では、平均0.53kWhの発電電力量が期待できる。太陽電池アレイの設置可能面積や船舶の消費電力に対する太陽光発電電力の供給比率について今後検討の必要があるが、欧州航路や豪州航路を航行する船舶に太陽電池を設置する事は、北米航路を航行する船舶に比べ有効である事が分かる。

6. まとめ

実際に海上を航行する船舶のログブックに記録されている正午位置、天候など、入手可能な限られたデータから日射量を推算する簡便な方法を開発し、その方法を基に期待できる太陽光発電電力量を求めた。開発した方法によって、気象庁の気象データを基に2001年の1年間、陸上において日積算日射量の推算値を計算し実測値との比較を行った。月別合計値を比較すると実測値と推算値の変化傾向はほぼ同様であつが、誤差割合の絶対値は最大23.8%であり、本稿で開発した推算方法には多少の誤差を含むと考える。

航路別の日積算日射量を求めると、北米航路では平均2.53kWh/m²、豪州航路では平均4.18kWh/m²、欧州航路では平均4.45kWh/m²になった。航路別に比較すると、欧州航路が最も多く、次に豪州航路が多かった。また、季節別に比較すると、各航路とも冬季よりも夏季の方が多かった。次に、その結果から各航路を航行す

る船舶の甲板上に太陽電池アレイを設置した場合の 1m^2 あたり1日の発電電力量を求めると、北米航路を航行する船舶では、平均0.30kWh、豪州航路を航行する船舶では、平均0.50kWh、欧州航路を航行する船舶では、平均0.53kWhの発電電力量が期待できる。

海上の日射量を推算する際、大気透過率と天候係数を陸上の場合と同じ値を使用する為、多少の誤差が生じると考えられるが、本稿で開発した方法によってどの航路でも即座に、簡便に日射量を推算できる意義は大きい。船舶は移動する為、日射量の推算が困難であるが、本稿で開発した方法によって日射量を推算すれば、太陽光発電システムの導入を検討する際、発電量計算は容易になるであろうと考える。

謝辞

本研究を実施するにあたって、資料提供に御協力頂きました日本郵船株式会社、後藤湖舟氏、文挟克実氏、及び田嶋稔氏に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 財団法人シップ・アンド・オーシャン財団: 平成12年度船舶からの温室効果ガス(CO₂等)の排出削減に関する調査研究報告書, p. 6 (2001)
- 2) 薦田哲男・花房眞: 船舶からの大気汚染物質の排出実態と規制動向, 日本マリンエンジニアリング学会誌, Vol.37, No.1, pp.58-67 (2002)
- 3) 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, 日本太陽エネルギー学会誌, Vol.24, No.1, pp. 41-45 (1998)
- 4) K. Sumi, T. Hikima, and T. Katagi: Basic Research on the Application of Wind Generating System and Photovoltaic Generating System to a Large Container Ship, Proceedings of the World Renewable Energy Congress February 1999, pp. 553-559 (1999)
- 5) K. Sumi, T. Hashimoto, S. Yamamoto, and T. Hikima: Study on the Application of Wind Energy Generation System to a Small Ship, Proceeding of ASME FEDSM'01, FEDSM2001-18150 (2001)
- 6) 角和芳・引間俊雄・橋本武・山本茂広: 風力発電システムの大形石炭専用船への応用に関する研究, 日本マリンエンジニアリング学会誌, Vol.36, No.3, pp.22-29 (2001)
- 7) 太陽光発電懇話会: 太陽光発電システムの設計と施行, オーム社, p. 206 (2000)
- 8) 新太陽エネルギー利用ハンドブック編集委員会: 新太陽エネルギー利用ハンドブック, 日本太陽エネルギー学会, pp.32-37 (2000)
- 9) 太陽エネルギー利用ハンドブック編集委員会: 太陽エネルギー利用ハンドブック, 日本太陽エネルギー学会, pp. 15-20 (1985)
- 10) 福地章: 海洋気象講座, 成山堂, p.167 (1975)