



風力発電及び太陽光発電の船舶電源への導入に関する研究

角, 和芳

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2004-03-31

(Date of Publication)

2009-12-10

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲0041

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/DS100041>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



神戸商船大学
博 士 論 文

風力発電及び太陽光発電の
船舶電源への導入に関する研究

2004 年 1 月

神戸商船大学大学院 商船学研究科
博士後期課程 海洋機械エネルギー工学専攻

角 和芳

目次

第1章 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 本研究の意義	5
1.3 本論文の構成	9
第2章 船舶電源への風力発電システムの導入検討と評価	11
2.1 はじめに	11
2.2 風力発電装置の設置場所, 翼直径, 設置数の検討	11
2.3 風況の分析	11
2.4 風力発電装置の運転風速	14
2.5 風力発電電力量	15
2.6 風力発電システムを導入する船舶電源システムの構成	17
2.7 風力発電システムの主機関出力への影響	18
2.7.1 風力発電装置の重量の影響	18
2.7.2 風力発電装置の空気抵抗の影響	19
2.8 風力発電システムの導入評価	20
2.9 まとめ	21
第3章 風力発電システムの実船導入へのケーススタディ	23
3.1 はじめに	23
3.2 大型船舶に対するケーススタディ	23
3.2.1 対象船舶	23

(1)航路と主要目	23
(2)現行電源システムと使用電力量	23
3.2.2 風力発電システムを導入した船舶電源システム	26
(1)風況の分析	26
(2)風力発電システムの運転風速.....	27
(3)風力発電装置の設置場所と仕様, 風力発電量	28
(4)電源システムの構成.....	30
3.2.3 風力発電システムの重量及び空気抵抗の主機関出力への影響	32
3.2.4 省エネルギー及び大気汚染物質削減効果	33
3.3 小型船舶に対するケーススタディ	35
3.3.1 対象船舶.....	35
(1)航路と主要目	35
(2)現行の電源システムと使用電力量	36
3.3.2 風力発電システムを導入した船舶電源システム	38
(1)風況の分析	38
(2)風力発電システムの運転風速.....	38
(3)風力発電装置の設置場所と仕様, 風力発電量	39
(4)電源システムの構成.....	41
3.3.3 風力発電システムの重量及び空気抵抗の主機関出力への影響	42
3.3.4 省エネルギー及び大気汚染物質削減効果	43
3.4 まとめ.....	45

第 4 章 船舶電源への風力及び太陽光発電システム導入の検討と評価	47
4.1 はじめに.....	47
4.2 船上に設置した太陽電池からの発電電力の推算法	47
4.2.1 日射量推算法	48
(1)日射量推算の手順.....	48
(2)日積算日射量.....	50
(3)天候係数	51
4.2.2 陸上における日射量推算結果	52
4.2.3 航路上の日射量推算結果.....	54
(1)データ収集の対象航路と船舶.....	54
(2)各航路の正午に観測された天候の割合	55
(3)日射量推算結果	56
4.2.4 太陽光発電電力量の推算結果	58
4.3 風力及び太陽光発電システムの大型船舶への導入のケーススタディ	59
4.3.1 太陽電池アレイの設置場所, 設置面積	59
4.3.2 風力発電及び太陽光発電電力量.....	60
4.3.3 電源システムの構成	61
4.3.4 風力及び太陽光発電システムの重量の主機関出力への影響	62
4.3.5 省エネルギー及び大気汚染物質削減効果.....	62
4.4 まとめ	63

第 5 章 船舶電源に導入した風力及び太陽光発電システムの効果的運用方法	65
5.1 はじめに	65
5.2 風力・太陽光発電電力をピークロード用として利用する運用方法	65
5.2.1 運用方法とシステム構成	66
5.2.2 ピークカットを行う消費電力設定方法	68
5.2.3 燃料消費量の比較と削減効果の検討	69
(1) ディーゼル機関の小容量化による燃料消費量削減効果に関する考察	69
(2) 仮想風力・太陽光発電電力, 消費電力モデルを用いた燃料消費量の比較	72
5.2.4 シミュレーションによる運用方法の検証	75
(1) 対象船舶	76
(2) 風力発電装置の仕様と設置場所	77
(3) 太陽光発電装置の仕様と設置場所	79
(4) 風力・太陽光発電電力, 消費電力	80
(5) シミュレーションの条件	81
(6) シミュレーション結果	82
5.3 太陽光発電電力予測を用いたハイブリッドシステムの運用方法	83
5.3.1 システム構成と前提条件	83
(1) 太陽電池	84
(2) 負荷	84
(3) 蓄電池	86
(4) インバータ	86
(5) ディーゼル発電機	86
5.3.2 太陽光発電電力予測を用いたシステム運用方法	87

(1) 予測を用いない場合の運用方法	87
① 低充電電力方式	87
② ディーゼル発電機定格出力方式	88
(2) ディーゼル発電機出力決定に関する考察	88
(3) 太陽光発電電力予測を用いた運用方法	90
5.3.3 シミュレーションによる運用方法の検証	94
(1) シミュレーション方法	94
(2) 太陽光発電電力の予測方法	94
(3) 太陽光発電電力予測の精度	95
(4) シミュレーション結果	97
① ディーゼル発電機出力電力の例	97
② 燃料消費量の比較	100
5.4 まとめ	105
第 6 章 結論	107
謝辞	111
参考文献	113
本研究に関する発表	119

第1章 序論

1.1 研究の背景

現在、石油、石炭など、化石燃料の燃焼時に排出される CO_2 等の温室効果ガスが気候変動、生態系の破壊、海面上昇の原因である地球温暖化、窒素酸化物 (NO_x)、硫黄酸化物 (SO_x) が森林や湖沼の破壊を行う酸性雨の原因として問題となっている。

地球温暖化の原因である温室効果ガスの削減について、1997年に開催された COP3(国連の第3回気候変動枠組み条約締約国会議、通称、地球温暖化防止京都会議)において削減目標(日本の場合、2010年までに1990年を基準に6%削減する)が決められた。それを受けて、1998年、「地球温暖化対策の推進に関する法律」が制定されたが、1999年には逆に排出量が7%増加した。さらに、2002年3月、政府の地球温暖化対策推進本部によって「地球温暖化対策推進大綱」が決定された⁽¹⁾。「地球温暖化対策推進大綱」は、温室効果ガス排出量削減を図るため、長期的なエネルギー需給の見通しに配慮しつつ、産業、民生、運輸の各部門における省エネルギーを図るとともに、風力発電、太陽光発電、廃棄物発電、バイオマスエネルギーなどの新エネルギーや原子力の導入を促進し、エネルギーの需給両面にわたる対策を推進しようとしている。

新エネルギーとして期待される風力発電は各国で導入されており、2003年末の総設備容量は3,200万kWを超えており、ドイツの1,200万kWを筆頭に、アメリカ、スペイン、デンマーク、インドにおいて開発が進んでいる。日本では設備容量としては世界12位であるが、2000年に12万kWであったのが、2002年には38万kWと導入が急増し、すでに500基以上の大型風力発電装置が運転されている。

現在はまだ、年間電力消費量の 0.1%にも達しないが、2010 年までに 300 万kW の導入が目標とされている⁽²⁾。

大型風力発電装置の導入とともに、小型風力発電機(翼直径 7m未満)の導入も盛んに行われ、国内で 3000 台以上運転されている。小型風力発電機は街路灯、無線の中継基地、山小屋などの独立電源や、公共の建物、住宅用に商用電源と系統連系し使用されている⁽³⁾。

太陽光発電に関して、1974 年から 2000 年までのサンシャイン計画によって、実用化のため太陽電池変換効率の向上など、技術開発が行われた。日本における導入実績は 2000 年末で 31.7 万 kW に達している。このうち、NEDO(新エネルギー・産業技術総合開発機構)が実施した公共施設用太陽光発電フィールドテスト事業によって、1992 年～1997 年に 4,900kW の設置、産業等用太陽光発電フィールドテスト事業によって 1998 年～2000 年に 8,400kW の設置がなされ、実負荷での運転データの収集・解析を行い、実用性の検証が行われた。さらに、太陽光発電の普及を広めるために、住宅への導入を拡大して、量産効果による価格低減を喚起することが必要とされ、経済産業省では住宅用太陽光発電の設置者に対して設置費用の一部の補助を行っている。その結果、1994～1996 年度のモニター事業において 3,590 件(約 1.3 万 W)、1997～1999 年度の導入基盤整備事業において 27,885 件(約 10.1 万kW)の導入がなされた⁽⁴⁾。

地球温暖化問題は COP3 議定書の発効を巡って、当面各国が温室効果ガスの排出削減計画を立てる段階までになっている。船舶からの温室効果ガスについては、内航海運からの排出はこの削減計画の中で勘定されることになっている⁽⁵⁾が、外航船舶からの温室効果ガス排出については、国別の削減割り当てが相応しくないことから同議定書の対象ではなく、国際海事機関(IMO)におい

て削減方策を検討することとされている。2002 年 3 月, IMO 本部で開催された MEPC47(第 47 回海洋環境保護委員会)では, 船舶から排出される温室効果ガスについてワーキンググループが設置され削減策が検討された⁽⁶⁾。

一方, 酸性雨の原因となる NO_x 及び SO_x に関して, 1990 年に開催された MEPC29 において, 外航船舶に起因する NO_x 及び SO_x の排出量が地球全体の排出量のそれぞれ, 4% 及び 7% を占めるという報告がなされ, 1997 年, 「船舶からの大気汚染防止のための規則」が国際条約“MARPOL73/78”に追加され, 新議定書が IMO にて採択された。この新議定書によって, NO_x に関して 2000 年 1 月 1 日以降に建造される船舶に搭載される出力 130kW 以上のディーゼルエンジンについて規制値が定められ, SO_x に関しては, 硫黄分が 4.5wt% 未満の燃料油を使用するよう, 規制が設けられた⁽⁶⁾。

船舶の運航にともなって排出される温室効果ガスは CO_2 , メタン, 一酸化二窒素, 代替フロン等があるが, そのうち CO_2 が約 96% を占めるので, 温室効果ガスの削減は, すなわち燃料の削減を意味する。船舶は, 他の輸送機関に比べて単位輸送量(トン・マイル)当たりの燃料消費量が少ない優れた大量輸送機関である。このような特徴を有した船舶から CO_2 の排出量, つまり燃料消費量を削減することは大きな困難を伴う⁽⁷⁾。生産体制がグローバル化する中で, 経済規模が安定的に成長すると, それに見合って海上輸送量も多くなり, 一方, 船舶に係る技術的条件が現状のままだとすれば, それに連動して燃料消費量が増え, その結果 CO_2 の排出量も増加する。このような困難な状況ではあるが, 温室効果ガス削減は避けて通れない重大課題であり, IMO の MEPC では, 上述のようにその課題に取り組む熱心な議論が進められている。

NO_x及び SO_x排出削減であれば、前者ならディーゼル機関などの燃焼改善や SCR システム導入による排気ガス脱硝⁽⁸⁾、後者であれば燃料中の硫黄の低減や排ガス脱硫技術⁽⁹⁾導入によって可能であり、既述の MARPOL73/78 新附属書の発効も間近に控えて、すでにいくつかの対策が実用化されている。しかし、これらの対策は CO₂ 削減には無力であり、場合によっては燃料消費量の増大を招きかねない。したがって、CO₂ 削減の対策も不可避であることを視野に入れば、困難であっても、NO_x、SO_xさらには SPM(浮遊粒子性物質)の削減と、同時に、化石燃料消費削減をも追及する方策を考えなければならない。

CO₂削減方策として

A. 一層の省エネルギー技術の開発利用

B. 他の交通機関も含む総合交通システム対策

C. 化石燃料に替わる代替エネルギーの導入技術の開発利用

などが考えられている⁽⁷⁾。検討されている具体策を例示すれば、A に関しては船体抵抗低減や推進効率改善などの要素技術、ソフト面ではウエザールーチングによる最適航法技術の開発、あるいは、総合的な視点からのものにスーパーエコシップ(環境低負荷次世代内航船)などがあげられる。B については例えば、国土交通省によって国の施策としても進められているモーダルシフトがある。これは、船舶の利点を活かし、輸送エネルギー効率の悪いトラック輸送を海上輸送にシフトすることによって、交通輸送全体として燃料消費を減らそうとするねらいである。

C に関しては、炭素含有量の少ない天然ガスへの転換、あるいは DME(ジメチルエーテル)やメタノールなどの合成燃料の導入が挙げられるが、将来的には原動機に燃料電池を導入した水素利用が有力視されている。これらの燃料転換とは別に検討されるべき対策として、自然エネルギー、すなわち風力や太陽光の利用が

ある。既述のように、陸上では風力発電、太陽光発電技術は十分に実用化され、普及の段階に入っており、特に風力はコスト的にも将来、火力発電と競争できるほどになり、世界的にも、また日本でも導入が広がっている。

風力は船舶において古くから広く活用されているが、それは装帆によって風力から直接、推力を生み出す利用法⁽¹⁰⁾であり、現在、陸上で広がっているように風力を電力に変換するものではない。しかし、船上でも風から電力が得られれば多様に活用することができるであろう。

以上、大気汚染の悪化に伴い、船舶でも大気汚染対策が必要になってきているが、地球規模の気候変動問題も考慮すれば、 NO_x 、 SO_x 、SPM など従来取り上げられてきた汚染物質の削減と同時に、 CO_2 削減も追求すべき段階になっている。そのためには、化石燃料削減の課題に取り組まなければならない。本研究は、このような背景分析に立ち、その方策の一つである風力発電、太陽光発電を取り上げ、船舶電源への利用を提案するものである。

1.2 本研究の意義

船舶ではないが、オフショアに設置した風力発電施設の利用は、1980 年代に欧州において洋上風力発電に関する調査研究が開始され、具体的な事業はスウェーデン、デンマーク及びオランダにて着手された。1990 年に世界最初の洋上風力発電施設がスウェーデンに設置されたのを皮切りに、2000 年末の時点で 10 施設の洋上風力発電施設が建設あるいは建設中になっており、風車の総数は 93 基、総発電容量は 9.57 万 kW に達している。わが国においても、最近の試算によれば、

陸上の10倍以上、風力利用の可能性があることが明らかになり、今後は、より具体的なシステム設計と実証試験が待たれている⁽¹¹⁾。

風力発電を船舶電源へ利用する試みは小型ヨットに出力 1kW 未満のマイクロ風車が使用されているが、小型風力発電機の一般商船への利用についてはこれまでになされた例は見当たらない。風力発電が導入可能かどうかは、平均風速によって判断され、平均風速が 4m/s 以上であれば、年のうちの多くの日数、運転可能であり、6m/s 以上であれば、商業的に運転可能である⁽¹²⁾とされている。本研究において、導入を検討した船舶の風況を調査した結果、北米及び豪州航路を航行する船舶では平均風速 8m/s、瀬戸内海及び九州南西部を航行する船舶では平均風速 8m/s から 10m/s と、いずれの船舶も風力発電の導入が可能であると考ええる。

海上において太陽光発電は、ソーラーブイ⁽¹³⁾、レジャーボートの充電器、海洋牧場の音響給餌装置⁽¹⁴⁾、人工湧昇によって海域を肥沃化させる密度流拡散装置⁽¹⁵⁾等にご利用されており、ソーラーボートレースも国内外で開催されている⁽¹⁶⁾、⁽¹⁷⁾。太陽光発電の船舶への利用に関して、レースボートの推進用に C. Schaffrin の研究⁽¹⁸⁾や菊地らの研究⁽¹⁹⁾が行われ、ソーラー遊漁船の研究開発⁽²⁰⁾が行われている。太陽光発電の船舶電源への応用について、武田らの日本船用機関学会の電気電子システム研究委員会調査報告⁽²¹⁾、藤井らによって研究された⁽²²⁾が、武田らの調査報告では太陽光発電出力の推定値から、船舶への利用の可能性が検討されているが、環境面などへの効果は言及していない。また、藤井らの研究では、従来の船舶電源の設計法に準じていないなどの課題が残っていた。その後、2001年8月に小容量ながら太陽光発電を導入した大型船舶がつくられており⁽²³⁾、今後、導入が拡大すると考えられている。

そこで、本論文では今後、船舶への実用化が期待される風力発電及び太陽光発電の船舶電源への導入について検討を行う。まず、風力発電システムの導入について、実際に航行している船舶を対象に導入手順を検討し、省エネルギー及び大気汚染物質削減効果の評価を行う。そして、大型船舶と小型船舶を対象として、風力発電システムの船舶電源への導入のケーススタディを行い、問題点を考察する。

次に、風力発電及び太陽光発電システムを併せて導入する場合について検討する。海上を航行する船舶に太陽光発電システムを導入する場合、航行海域における日射量データが必要である。一般的な日射量データに関する限り、最近は気象衛星の画像を用いて推定された日射量の分布図が作成されている^{(24), (25)}。しかし、洋上を移動する船舶の甲板上の日射量を推算するのにそれらを利用するには手間がかかり困難である。そこで、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、天候などを利用して航路上の日射量を推算する簡便な方法を考察する。次に、それらを用いて、風力発電と太陽光発電を導入した場合について、大型船舶を例にケーススタディを行い、燃料消費量及び、 NO_x 、 SO_x 排出量削減効果について評価する。

以上、本研究の前半では、風力発電、太陽光発電を既存の船舶電源システムに単純連系方式で組み込んで利用する場合について調べる。次に、本研究の後半部分では視点を変えて、風力発電、太陽光発電と既存の船舶ディーゼル発電システムとを統合したハイブリッドシステムととらえ、それぞれの特性を考慮した効果的運用方法について研究する。

陸上では、風力発電あるいは太陽光発電とディーゼル発電機によって構成されたハイブリッドシステムが、基幹電力供給系統から孤立した離島の電源、無線中継

所、観光施設等で利用されている⁽²⁶⁾。また、このようなハイブリッドシステムのディーゼル発電機の燃料消費量削減を目的とした運用方法に関していくつかの研究が行われている。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⁽²⁷⁾。この時、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⁽²⁸⁾や、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⁽²⁹⁾。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⁽³⁰⁾、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ゼル発電機を制御するシステムを提案している⁽³¹⁾。

以上のような、陸上のハイブリッドシステムの運用方法が、風力及び太陽光発電容量や負荷電力の違いから、そのまま船舶電源に利用できるとは言い難い。そこで、本研究では、風力及び太陽光発電の船舶電源への導入を想定し、需要側である船内電力の負荷変動特性、及び逆に供給側である風力及び太陽光発電の電力変動特性に着目し、単純連系方式よりも省エネルギー効果が高いと期待される運用方法について、以下の方法を提案し考察を行う。

- ・風力・太陽光発電電力をピークロード用として利用する運用方法
- ・太陽光発電電力の予測を用いたハイブリッドシステムの運用方法

1.3 本論文の構成

本論文は、風力発電及び太陽光発電の船舶電源への導入に向けて、それらの検討方法や、運用方法に関する基礎的研究であり、以下のような構成になっている。

まず、研究の目的を述べた本章に引き続き、第 2 章では、実際に航行している船舶に風力発電システムの導入を検討する際の手順や評価方法を述べ、第 3 章では第 2 章で述べた手順を基に、大型船舶と小型船舶を対象として、風力発電システムの船舶電源への導入のケーススタディを行う。そして、現行電源システムの燃料消費量や NO_x 、 SO_x 排出量を比較し、風力発電システムを導入した電源システムの評価を行う。

第 4 章では、海上の自然エネルギーの有効利用を目的とし、風力発電と太陽光発電の船舶電源への導入を検討する。まず、太陽光発電の導入に関して、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、天候などから航路上の日射量を推算する簡便な方法を考察する。そして、第 3 章と同じ大型船舶を対象として、風力発電と太陽光発電の導入を検討し、燃料消費量及び、 NO_x 、 SO_x 排出量削減効果の評価を行う。

第 5 章では、発電用ディーゼル機関の効果的な燃料消費量削減を目的とし、船舶電源に導入した風力発電及び太陽光発電の運用方法について提案し、シミュレーションとケーススタディによって単純連系方式と比べてどの程度の効果が期待できるか評価を行う。

最後に、第 6 章で結論をまとめる。

第2章 船舶電源への風力発電システムの導入検討と評価

2.1 はじめに

実際に航行している船舶に風力発電システムを導入するにあたっては、船舶からのデータや図面が必要であり、その手順も重要である。本章では、船舶電源への風力発電システムの導入手順や評価方法を考察した結果について述べる。図 2.1 に考察した導入手順と評価方法を示す。

2.2 風力発電装置の設置場所、翼直径、設置数の検討

まず、導入にあたって、対象船舶の甲板上に風力発電装置の設置スペースを確保できるかどうか検討を行う。風力発電装置の設置場所は、船体の一般配置図を基に、周囲の状況を考慮し、船舶の運航や荷役の妨げにならず、海上の風力エネルギーを十分利用できる場所を選ぶ。翼直径は風力発電量に大きく関係するため、風の持つエネルギーをできるかぎり有効に利用するように、設置場所の周囲の状況を考慮し決定する。

2.3 風況の分析

設置した風力発電装置の運転風速の設定や風力発電電力量を計算するため、航海中の風速、風向データを収集し分布図を作成する。本研究でのケーススタディでは、入手可能な限られたデータを用いて検討を行った。具体的に、大型船舶の場合、対象船舶の機関ログブックに記入された、1 日あたりの平均風速値と平

均風向を使用し、小型船舶の場合、1時間あたりの風速、風向データを使用した。
ここで、本論文の風速は船舶で計測された真風速から船速を差し引いた相対風速を示す。また、風向においても相対風向を示す。

2.4 風力発電装置の運転風速

風力発電装置のカットイン(発電開始)風速, 定格風速, カットアウト(発電停止)風速は以下に述べるように設定する。図 2.2 は平均風速が 7m/sの理論的な風速の出現頻度(レイレ分布)と, 風速の出現頻度とその風速のエネルギーを掛け合わせた風力エネルギーの分布を示す。風速の出現頻度のピークは風速 6m/s あたりにある。しかし, 風の持つエネルギーは風速の 3 乗に比例するので, 風力エネルギーのピークは, 風速 11m/s の時である。ここで, 風力エネルギーがピークになる風速を定格風速に設定すると, 発電量が最大になるため, このような風速分布の場合, 定格風速を 11m/s に設定する。また, カットイン風速は 3m/s から 6m/s, カットアウト風速は風力発電機的设计強度から考慮され, 20m/s から 30m/s の範囲である⁽¹²⁾ので, それを参考に, カットイン風速, カットアウト風速を設定する。船舶に導入する風力発電装置の定格風速も, 平均風速値の分布と, レイレ分布及び風力エネルギー分布を比較し設定すれば, 風力を有効に利用することができる。

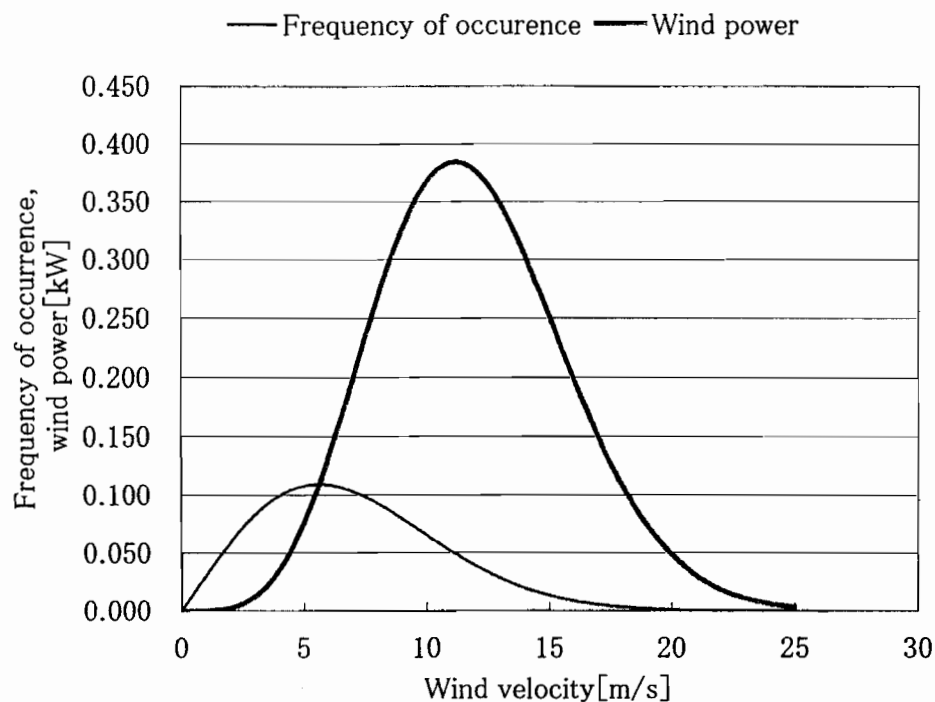


図 2.2 平均風速 7m/sの風速の出現頻度，風速の出現頻度を考慮した風力エネルギーの分布

2.5 風力発電電力量

導入を仮定した風力発電システムの推定風力発電電力量は，風力発電システムの出力特性を基に次式を用いて計算する⁽³²⁾。

$$E_w = H_j \int_{v_i}^{\infty} f(v) P_w(v) dv \quad (2.1)$$

ただし， E_w : 風力発電電力量 [kWh]

H_j : 発電装置稼動時間[h]

v : 風速値[m/s]

$f(v)$: 風速の出現頻度関数

(レイレ分布関数)

$P_w(v)$: 風力発電システムの出力[kW]

C_o : カットアウト風速[m/s]

C_i : カットイン風速[m/s]

ここで、風速の出現頻度関数は次式で表される。

$$f(v) = \frac{\pi}{2} \left(\frac{v}{v_o} \right) \exp \left\{ -\frac{\pi}{4} \left(\frac{v}{v_o} \right)^2 \right\} \quad (2.2)$$

ただし、 $f(v)$: 風速の出現頻度関数

(レイレ分布関数)

v_o : 平均風速値[m/s]

風力発電システムの出力は、運転風速を基に次式を用いて計算する⁽³³⁾。

$$P_w(v) = 0.5 \rho A_w v^3 \eta_w \times 10^{-3} \quad (2.3)$$

ただし、 $P_w(v)$: 風力発電システムの出力[kW]

ρ : 空気密度[kg/m³], 本研究では $\rho = 1.20$ とする。

A_w : 風車受風面積 [m²]

v : 風速値 [m/s]

η_w : 総合効率

また、総合効率は次式で表される⁽³³⁾。

$$\eta_w = \eta_1 \eta_2 \eta_3 \quad (2.4)$$

ただし、 η_w : 総合効率

η_1 : 理想風車の効率であり、風の持つエネルギー

から、風車を取り出すことのできる割合を示す。

本研究では、 $\eta_1 = 0.593$ とする⁽³³⁾。

η_2 : 風車効率であり、風車の流体力学的な損失を

考慮している。本研究では $\eta_2=0.70$ とする⁽³³⁾。

η_3 : 風力発電装置及び電力変換機器の効率,

本研究では $\eta_3=0.80$ とする⁽³³⁾。

2.6 風力発電システムを導入する船舶電源システムの構成

風力発電システムを導入する電源システムは、風力発電電力量と使用電力量のバランスによって以下のように構成される。

$$\text{風力発電電力量} > \text{使用電力量} \quad (2.5)$$

のとき、図 2.3 に示すように、蓄電池を設けて、余剰電力を蓄電池に充電し、風力発電電力が不足するとき、蓄電池とディーゼル発電機によって電力供給を行う⁽²⁶⁾。

$$\text{風力発電電力量} < \text{使用電力量} \quad (2.6)$$

のとき、図 2.4 に示すように、蓄電池を設けず、単純連系方式にて電力を供給し、不足分はディーゼル発電機によって供給する。ほとんどの船舶の場合、風力発電だけで船内の使用電力量を賄うことは不可能であると考えらるため、図 2.4 の構成になる。ここで、使用電力量は機関ログブックに記載されている電力値から求めることができる。また、船舶の電源システムは 440V 交流、220V 交流、100V 交流、及び 24V 直流等、負荷系統が分かれているので、余剰電力を発生させないように、電力調査表によって各系統の需要電力を調査し、風力発電システムからの電力供給系統を検討する必要がある。

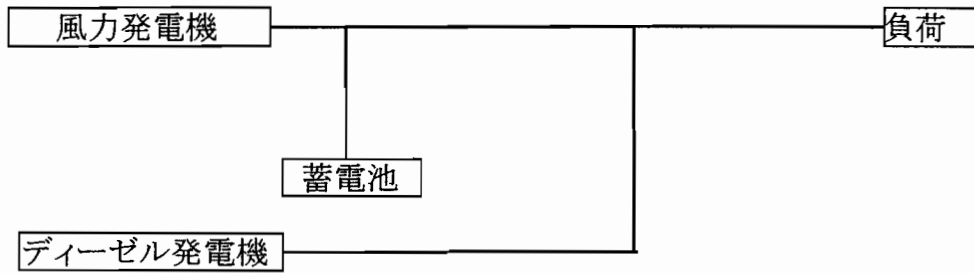


図 2.3 電源システムの構成(蓄電池有り)

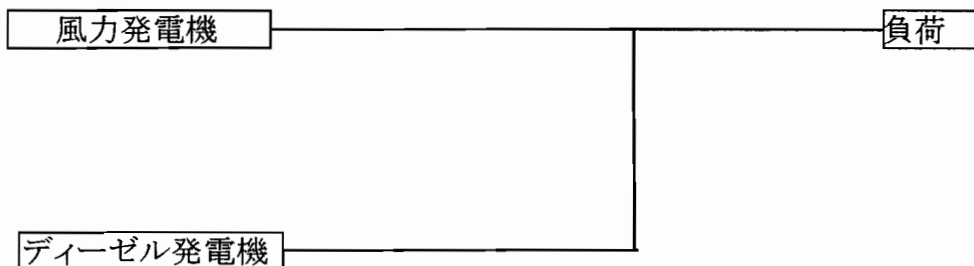


図 2.4 電源システムの構成(蓄電池無し)

2.7 風力発電システムの主機関出力への影響

2.7.1 風力発電装置の重量の影響

船舶の甲板上に風力発電装置を設置すれば、その重量によっては、現行に比べ浸水表面積が増加し抵抗が増加するため、主機関出力も増加し、現行に比べ燃料消費が増加する可能性がある。したがって、排水量等曲線図を用いて風力発電システムの重量を基に、浸水表面積を求め、主機関出力への影響を考慮する。

2.7.2 風力発電装置の空気抵抗の影響

甲板上に設置した風力発電装置は風が吹いているとき発電するが、同時に風によって空気抵抗を受ける。したがって、以下に示すように風力発電装置に働く空気抵抗を計算し、燃料消費に与える影響を考慮する。

設置した風力発電装置に働く空気抵抗による主機関出力の増加量は、風速の出現頻度を考慮に入れた次式を用いて計算する。

$$\Delta BHP = \int_0^{V_m} f(v)B(v)dv \quad (2.7)$$

ただし、 ΔBHP : 主機関出力の増加量[kW]

$f(v)$: 風速の出現頻度関数

(レイレ分布関数)

$B(v)$: 主機関出力増加量の特性[kW]

V_m : 最大出現風速[m/s]

そして、主機関出力の増加量の特性は次式で表される⁽³⁴⁾。

$$B(v) = \frac{R_s(v)V_s}{\eta_p} \times 10^{-3} \quad (2.8)$$

ただし、 $B(v)$: 主機関出力の増加量の特性[kW]

$R_s(v)$: 空気抵抗[N]

V_s : 船速[m/s]

η_p : 推進効率、本研究では $\eta_p=0.64$ とする⁽³⁴⁾。

また、風力発電装置に働く空気抵抗は次式で表される⁽³⁵⁾。

風速が 0m/s からカットイン風速未満及びカットアウト風速以上のとき

$$R_s(v) = 9.8 \times 2 \times 0.0064 S_r A_r v^2 \cos \theta \quad (2.9)$$

風速がカットイン風速からカットアウト風速未満のとき

$$R_a(v) = 9.8 \times 0.0064 A_w v^2 \cos \theta \quad (2.10)$$

ここで, $R_a(v)$: 空気抵抗[N]

S_r : 風車のソリディティ比, 本研究では $S_r = 0.04$ とする⁽³³⁾。

A_w : 風車受風面積 [m²]

v : 風速値 [m/s]

θ : 船首方向から相対風向の角度

2.8 風力発電システムの導入評価

ここでは, 風力発電システムを導入した電源システムの燃料消費量, NO_x, SO_x 排出量を求め, 導入していない場合と比較し, その削減量によって導入の評価を行う。

燃料消費量は, 機関ログブックに記載されている発電用ディーゼル機関及び主機関の出力と燃料消費量からそれぞれの特性を作成する。そして, 発電用ディーゼル機関及び主機関の出力から, 現行の燃料消費量を求める。そして, 風力発電電力と空気抵抗による主機関出力の増加量から, 風力発電システムを導入した電源システムの燃料消費量を求める。

NO_x 排出量は機関負荷率を考慮した次式を用いて計算する⁽³⁶⁾。

$$E_{NT} = \{ 2.11 - 1.92(1-z) \} P_D^{1.14} 10^{-3} \times 46/22.4 \quad (2.11)$$

ただし, E_{NT} : NO_x 排出量[kg/h]

z : 機関負荷率

P_D : ディーゼル機関の出力[kW]

SO_x 排出量は燃料消費量を基に次式を用いて計算する⁽³⁶⁾。

$$E_{ST} = FC_S \quad (2.12)$$

ただし, E_{ST} :SO_x排出量[kg/h]

F :燃料消費量[kg/h]

C_S :硫黄含有量[wt%]

2.9 まとめ

以上, 実際に航行している船舶に風力発電システムの導入手順や評価方法について述べた。本章に示した手順は, データや図面が入手できれば, 船舶の種類や大きさ, 航路を問わず, すべての船舶に適用できると考える。次章から, 本章にて考察した手順を基に, 大型船舶と小型船舶を対象として, 風力発電システムの船舶電源への導入のケーススタディを行い, 燃料消費量及び, NO_x, SO_x 排出量削減効果について評価を行い, 問題点を考察する。

第 3 章 風力発電システムの実船導入への ケーススタディ

3.1 はじめに

本章では、第 2 章で述べた導入手順と評価方法を基に、大型船舶と小型船舶に分けて、風力発電システムの船舶電源への導入のケーススタディを行い、風力エネルギーの船舶電源への利用の可能性を検討した。

3.2 大型船舶に対するケーススタディ

3.2.1 対象船舶

(1)航路と主要目

大型船舶への導入について、甲板上に広いスペースがあり、風力発電装置を設置する場所が確保できる大型石炭専用船を対象とした。対象とした大型石炭専用船は日本郵船株式会社所有の船舶であり、日本から北米西岸及び日本から豪州東岸を、約 24 日で往復航海している。この船舶の平成 10 年 2 月 21 日から平成 11 年 3 月 3 日までの外洋航海中の 280 日について検討を行った。表 3.1 に対象船舶の主な仕様を示す。図 3.1 に対象船舶の航路を示す。

(2)現行電源システムと使用電力量

現行電源システムは、図 3.2 に示すように、容量 530kW のディーゼル発電機を 3 基装備し船内に電力を供給している。また、非常用として容量 100kW のディーゼル発電機を 1 基装備している。航海中は、容量 530kW のディーゼル発電機 1 基によって、船内に電力を供給している。

航海中の使用電力量は、機関ログブックから集計した結果、1 時間あたり最大 383kWh、最小 259kWh、平均 320kWh であった。表 3.2 に航海中、出入港時、荷役中における 1 時間あたりの使用電力量の平均値、発電機使用台数、及び負荷率を示す。

表 3.1 対象船舶の主な仕様

船体	
全長	239.8 m
幅	43.0 m
総トン数	58103 t
載貨重量トン数	91447 t
航海速力	14.5 knots
主機	ディーゼル機関 1 基
連続最大出力	11672 kW
連続回転数	1.6 s ⁻¹
発電用原動機	ディーゼル機関 3 基
出力	576 kW
回転数	12 s ⁻¹
発電機	三相交流発電機 3 基
電圧	450 V
周波数	60 Hz
容量	530 kW
回転数	12 s ⁻¹
非常用ディーゼル発電機 1 基	
容量	100 kW

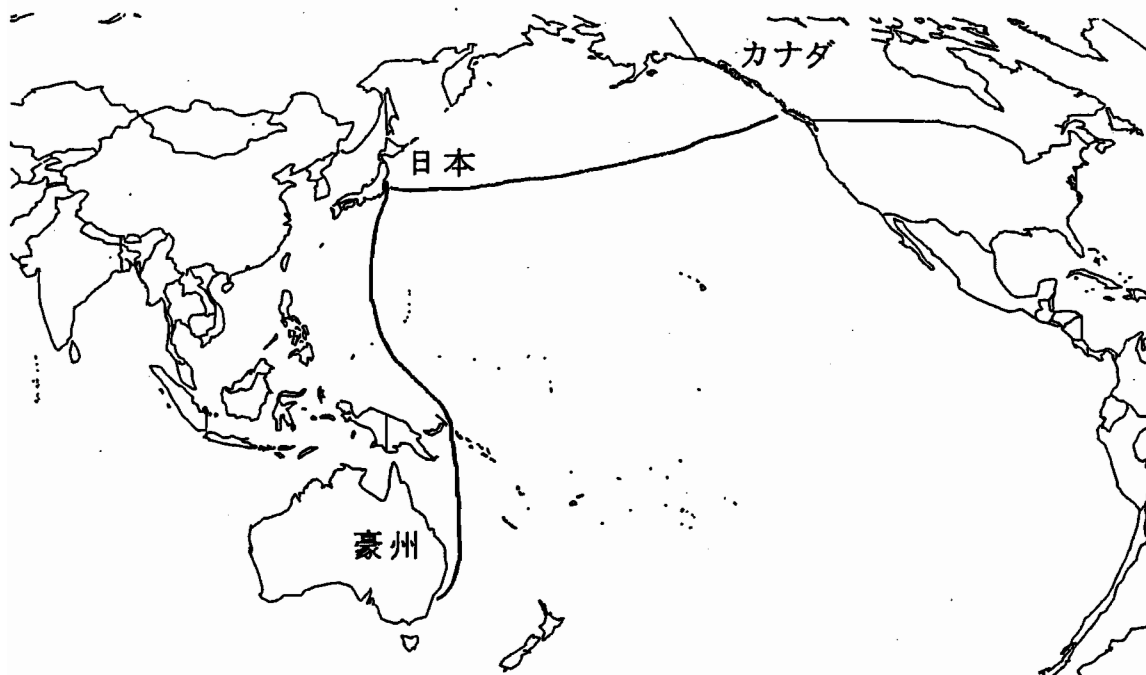


図 3.1 対象とした船舶の航路

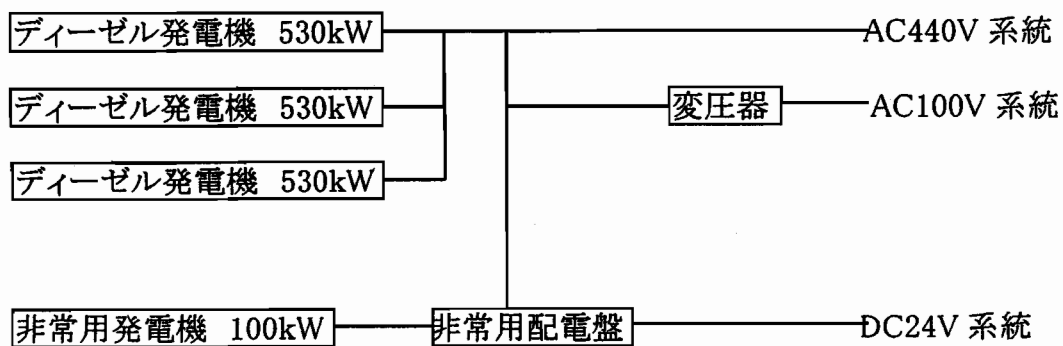


図 3.2 現行電源システム

表 3.2 平均使用電力量と発電機使用台数, 負荷率

	使用電力量 [kWh]	発電機 使用台数	負荷率 [%]
航海中	320	1	60
出入港時	937	2	89
荷役中	940	2	89

3.2.2 風力発電システムを導入した船舶電源システム

(1) 風況の分析

航海中の風況を分析し, 風力発電システムの運転風速や発電電力量を計算するため, 対象船舶の機関ログブックに記載されている 1 日あたりの平均相対風速値を集計しその分布図を作成した。図 3.3 に作成した 1 日あたりの平均風速値の分布図を示す。

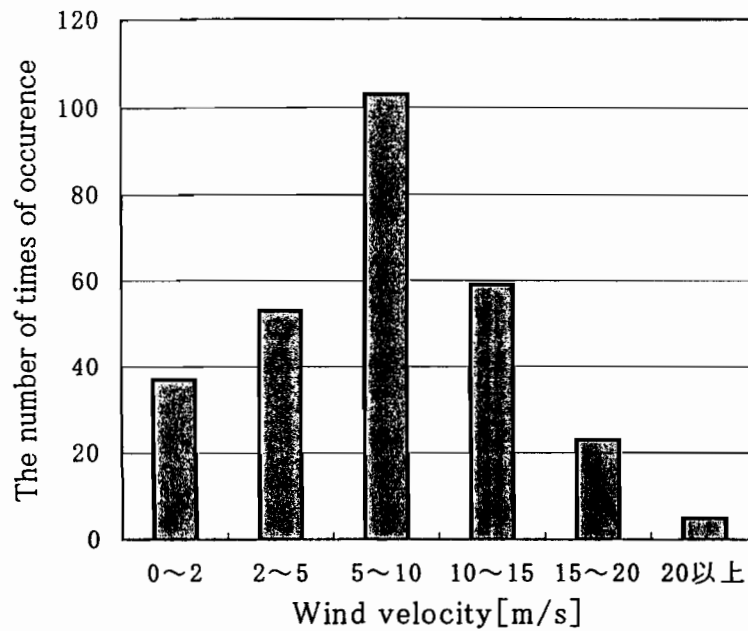


図 3.3 1 日あたりの平均風速値の分布図

(2)風力発電システムの運転風速

風力発電システムの定格風速は、図 3.3 示す 1 日あたりの平均風速値の分布と類似した図 3.4 に示す平均風速 8m/s の理論的な風速の出現頻度の分布 (レイレ分布)と、風力エネルギーの分布を基に設定した。図 3.4 を見ると風速の出現頻度のピークは風速 7m/s のあたりにあるが、風力エネルギーのピークは風速 13m/s の時である。したがって、定格風速を 13m/s に設定した。そして、カットイン風速及びカットアウト風速は普及している小型風力発電機からそれぞれ、4m/s と 25m/s に設定した。

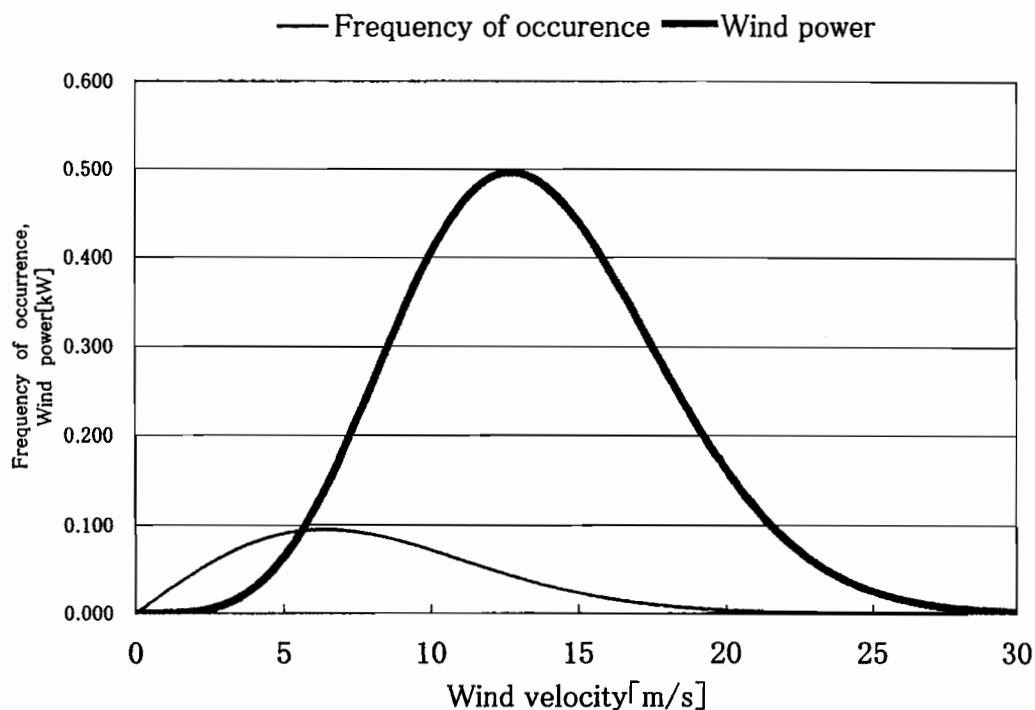


図 3.4 平均風速 8m/s の風速の出現頻度分布, 風速の出現頻度を考慮した風速エネルギーの分布

(3)風力発電装置の設置場所と仕様, 風力発電量

対象船舶の船体の一般配置図を基に, 風力発電装置の設置場所, 翼直径, ブレード中心高さを検討した。

風力発電装置の設置場所は荷役時にハッチカバーの開閉や, 出入港時にハッチカバーの左右に設置されている係船機器の操作の妨げにならないように考慮した。翼直径は, 風の持つエネルギーをできるだけ有効に利用し, 各ハッチ間の距離から最大になるように計算した。ブレード中心高さは船橋から操船の妨げとならない高さに計算した。

図 3.5 に風力発電装置の設置場所を示す。甲板上の各ハッチ間に, プロペラ形

の翼直径 6m, 翼枚数 2 枚, ブレード中心高さ 7m の風力発電装置を 12 基設置するように仮定した。そして, (2.3) 式から導入を仮定した風力発電システムの出力特性を作成した。図 3.6 に風力発電システムの出力特性を示す。定格風速時, 風力発電システムの定格出力は 12.4kW になった。

導入を仮定した風力発電システムからの風力発電電力量はその出力特性を基に, (2.1) 式を用いて計算した。計算の結果, 推定風力発電電力量は最大 2107.2kWh/day, 平均 964.4kWh/day になった。

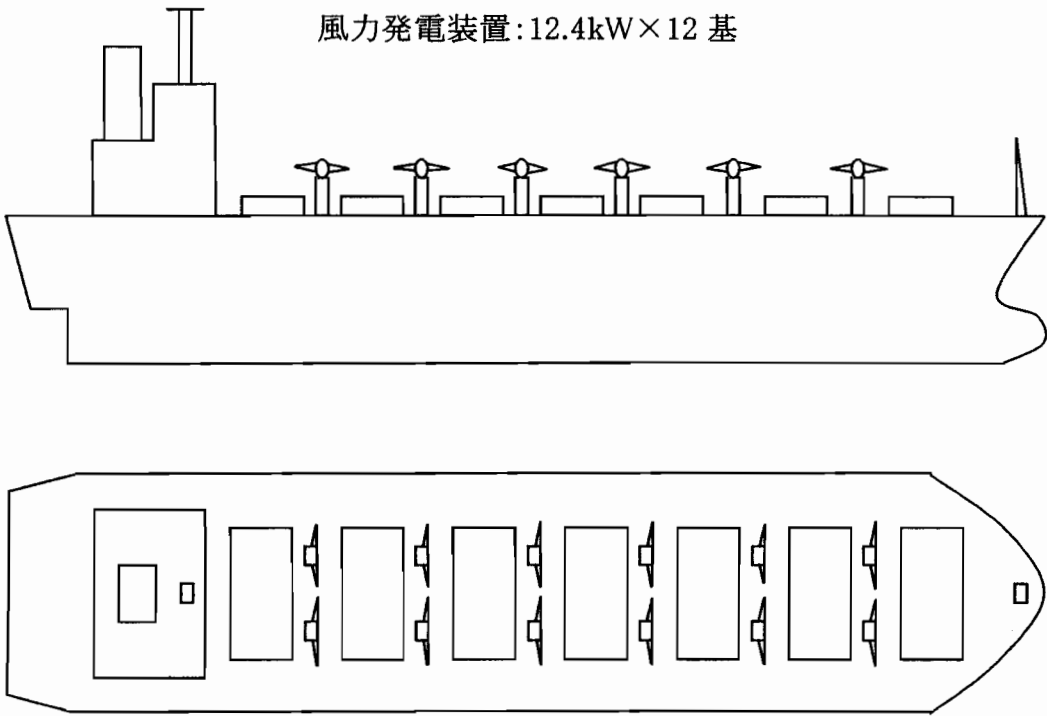


図 3.5 風力発電装置の設置場所

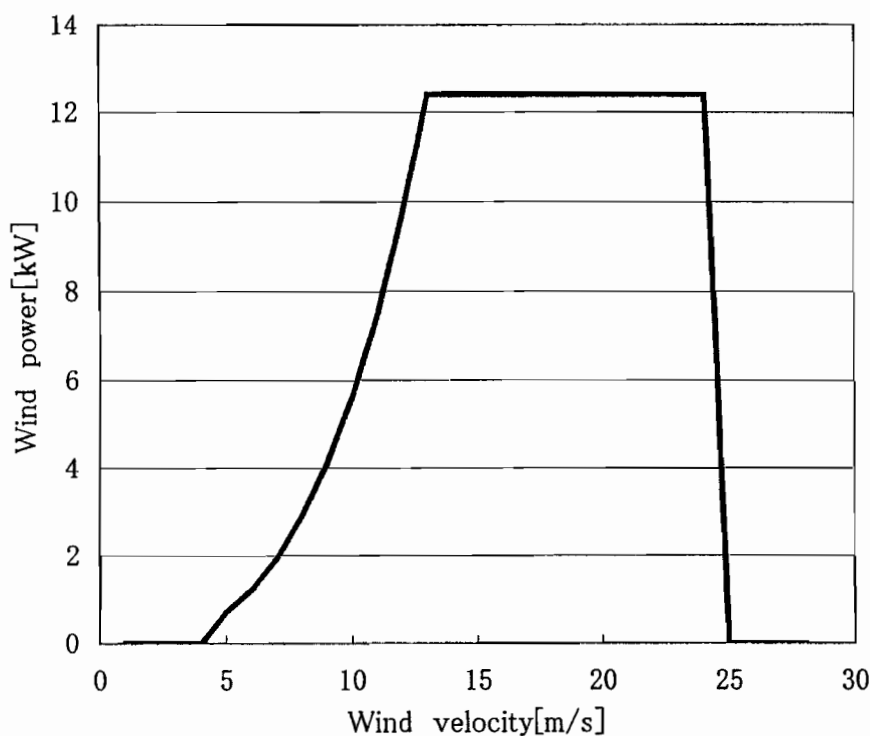


図 3.6 風力発電システムの出力特性

(4)電源システムの構成

推定風力発電電力量から 1 時間あたり最大 87.8kWh, 平均 40.2kWh の電力量が見込まれる。使用電力量は機関ログブックから, 1 時間あたり最大 383kWh, 最小 259kWh, 平均 320kWh であるので, 常に使用電力量が風力発電電力量より多い。したがって, 図 3.7 に示すように風力発電装置からの電力を単純連系方式にて供給する構成にした。また, 対象船舶の電力調査表から, AC100V 系統の需要電力量は 1 時間あたり 50kWh であり, 風力発電電力を AC100V 系統に供給すると, 余剰電力が発生する可能性があるため, AC440V 系統に供給するシステムにした。

推定風力発電電力量と使用電力量から, 風力発電システムによって船内に供給

できる電力量の割合を計算した。図 3.8 に風力発電電力量の使用電力量に占める割合を示す。風力発電量の使用電力量に占める割合は最大 33.4%, 平均 12.9% になった。

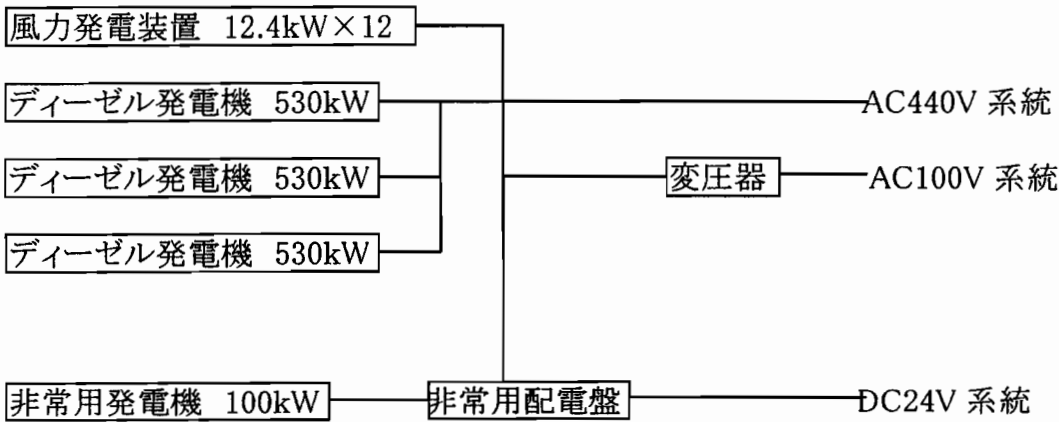


図 3.7 風力発電システムを導入した電源システム

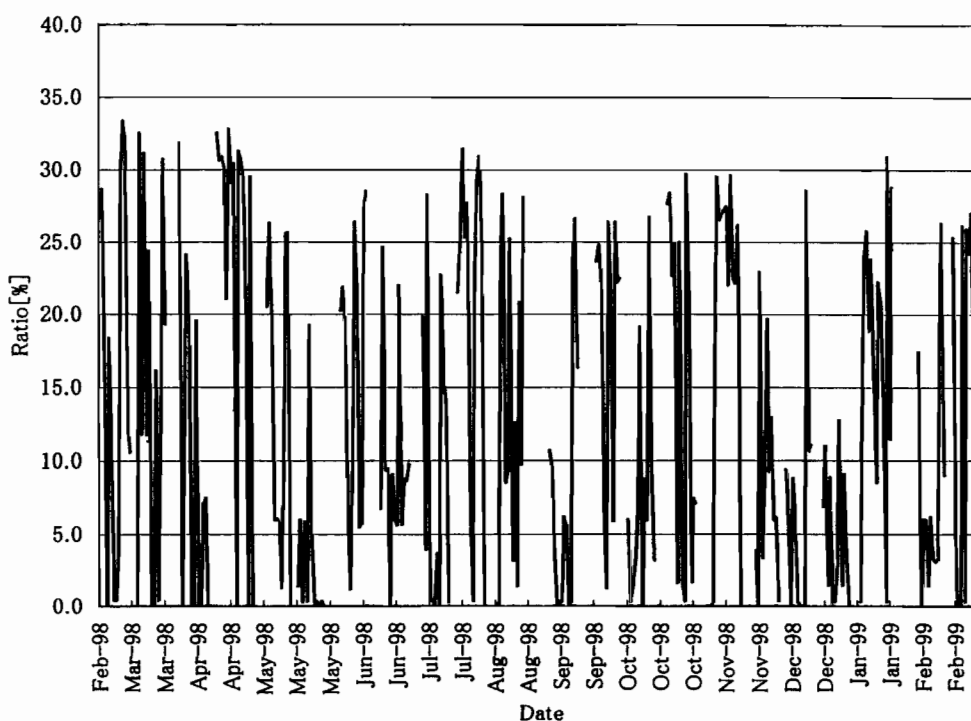


図 3.8 風力発電電力量の使用電力量に占める割合

3.2.3 風力発電システムの重量及び空気抵抗の主機関出力への影響

風力発電システムの重量の主機関出力への影響について、対象船舶の場合、船体の重量が約 5ton 増加し、排水量等曲線図を用いて浸水表面積を求めると、0.004%増加する。浸水表面積と主機関出力は比例するが、浸水表面積の増加率が微小であるので、主機関出力には影響ないとする。

風力発電装置に働く空気抵抗の主機関出力への影響について、空気抵抗による主機関出力の増加量は、風速の出現頻度を考慮に入れた(2.7)式を用いて計算した。

計算の結果、風速 14.5m/s の風が船首から吹いた時、1 時間あたり最大 23.0kWhの主機関出力の負担になるが、風力発電電力量は 1 時間あたり 90.1

kWh になった。このときの発電用ディーゼル機関の燃料消費量は 16.2kg/h削減され、主機関の燃料消費量は 3.3kg/h増加し、全体で燃料消費量は 12.9kg/h削減され、省エネルギーの効果が期待されることが明らかになった。

3.2.4 省エネルギー及び大気汚染物質削減効果

現行電源システムと、風力発電システムを導入した電源システムの発電用ディーゼル機関及び主機関の燃料消費量、 NO_x 、 SO_x 排出量を求め比較を行い、風力発電システムを導入した電源システムの省エネルギー及び大気汚染物質削減効果について考察した。

燃料消費量は機関ログブックに記載されている発電用ディーゼル機関及び主機関の出力と燃料消費量からそれらの特性を作成した。そして、発電用ディーゼル機関及び主機関の出力から現行の燃料消費量を求め、風力発電電力と空気抵抗による主機関出力の増加量から、風力発電を導入した電源システムの燃料消費量を求めた。図 3.9 に発電用ディーゼル機関出力と燃料消費量の特性を、図 3.10 に主機関出力と燃料消費量の特性を示す。

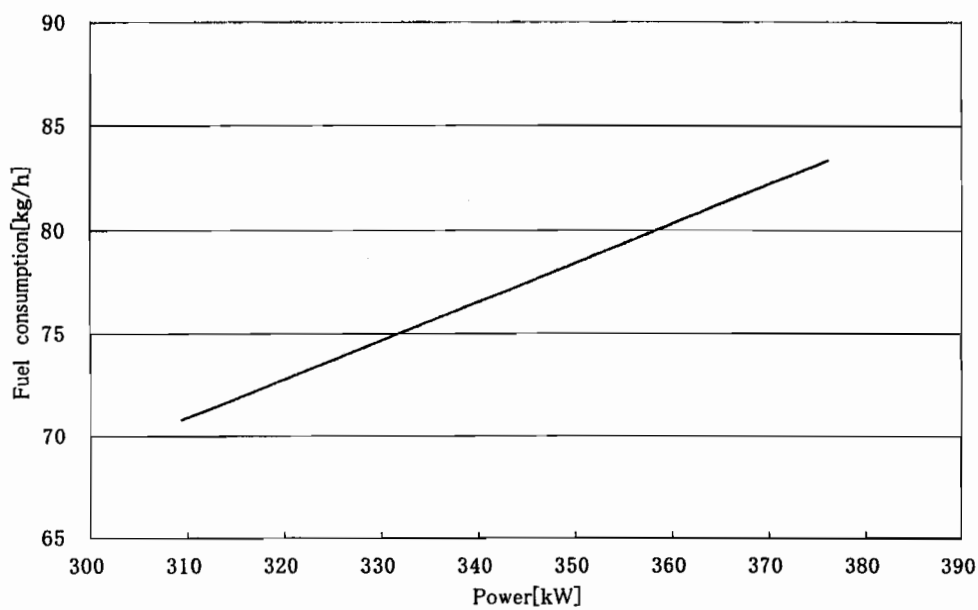


図 3.9 発電用ディーゼル機関出力と燃料消費量の特性

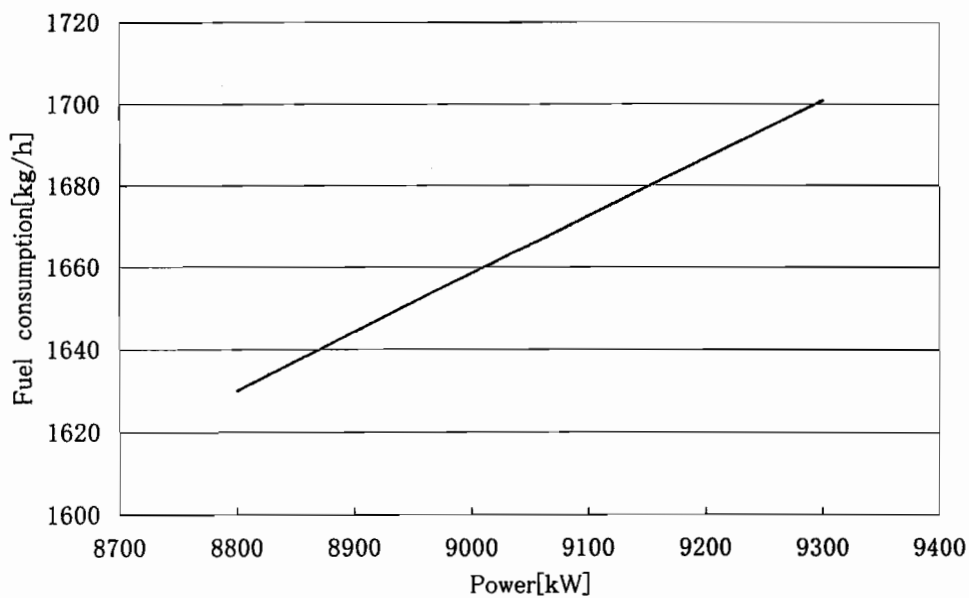


図 3.10 主機関出力と燃料消費量の特性

NO_x排出量は機関負荷率を考慮した(2.11)式を用いて計算し、SO_x排出量は燃料消費量を基に、(2.12)式を用いて計算した。

燃料消費量は現行電源システムでは、平均 1764.0kg/h、風力発電システムを導入した電源システムでは平均 1758.6kg/h になった。1 日あたり129.6kg、対象日全体で 48.4ton 削減が期待できる。

NO_x排出量は現行電源システムでは、平均 149.7kg/h、風力発電システムを導入した電源システムでは平均 149.4kg/h になった。1 日あたり 7.2kg、対象日全体で 2.3ton の削減が期待できる。

SO_x 排出量は現行電源システムでは、平均 52.9kg/h、風力発電システムを導入した電源システムでは平均 52.7kg/h になった。1 日あたり4.8kg、対象日全体で 1.4ton の削減が期待できる。

3.3 小型船舶に対するケーススタディ

3.3.1 対象船舶

(1)航路と主要目

小型船舶への導入について、神戸商船大学所有の練習船“深江丸”を対象に検討した。“深江丸”は学内船舶実習時、大阪湾や瀬戸内海を航海し、研究航海や公開講座時、沖縄や鹿児島への航海を行っている。1 日の平均航海時間は学内船舶実習時、約 7 時間である。この船舶の平成 11 年 5 月 25 日から 8 月 31 日まで行われた合計 36 日の航海について検討を行った。表 3.3 に深江丸の主要目を示す。図 3.11 に検討を行った期間の深江丸の航路を示す。

(2)現行の電源システムと使用電力量

現行の電源システムは、容量 200kW のディーゼル発電機を 2 基、容量 200kW の軸発電機を 1 基、及び非常用として容量 25kW のディーゼル発電機を 1 基装備している。通常航海時は、容量 200kW のディーゼル発電機 1 基で船内に電力を供給している。検討を行った航海中の使用電力量は 1 時間あたり、最大 120.0kWh、最小 58.0kWh、平均 80.8kWh であった。

表 3.3 深江丸の主要目

船体	
全長	50.0 m
幅	10.0 m
総トン数	674.0 t
排水量	780.0 t
航海速力	14.0 knots
主機 ディーゼル機関 1基	
連続最大出力	1102.5 kW
連続回転数	12 s ⁻¹
発電用原動機 ディーゼル機関 2 基	
出力	220.5 kW
回転数	20 s ⁻¹
発電機 三相交流発電機 2 基	
電圧	225 V
周波数	60 Hz
容量	200 kW
回転数	20 s ⁻¹
軸発電機	
電圧	225 V
周波数	60 Hz
容量	200 kW
回転数	15 s ⁻¹
非常用ディーゼル発電機 1 基	
容量	25 kW

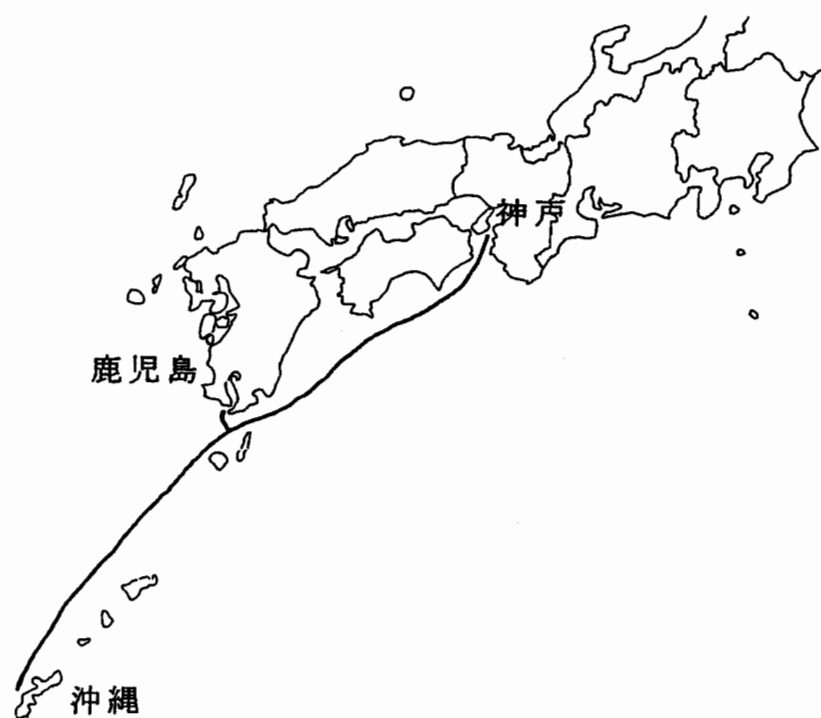


図 3.11 深江丸の航路

3.3.2 風力発電システムを導入した船舶電源システム

(1) 風況の分析

航海中の風況を分析し、風力発電システムの運転風速や発電電力量を計算するため、風速、風向データの計測フォームを作成し、航海中 1 時間毎に記入して頂き図 3.12 に示す風速値の分布を作成した。

(2) 風力発電システムの運転風速

風力発電システムの定格風速は、図 3.12 示す風速値の分布と類似した図 3.13 に示す平均風速 10m/s の理論的な風速の出現頻度の分布(レイレ分布)と、風力エネルギーの分布を基に設定した。図 3.13 を見ると、風速の出現頻度のピークは風速 8m/s のあたりにあるが、風力エネルギーのピークは風速 16m/s の時である。したがって、定格風速を 16m/s に設定した。そして、カットイン風速及びカットアウト風速は、普及している小型風力発電機から、それぞれ 5m/s と 25m/s に設定した。

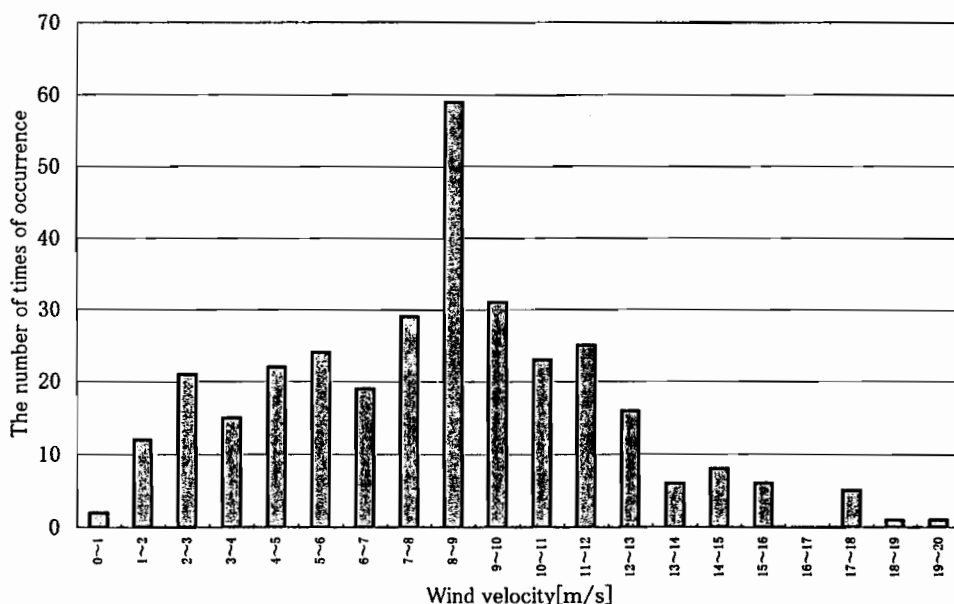


図 3.12 風速値の分布

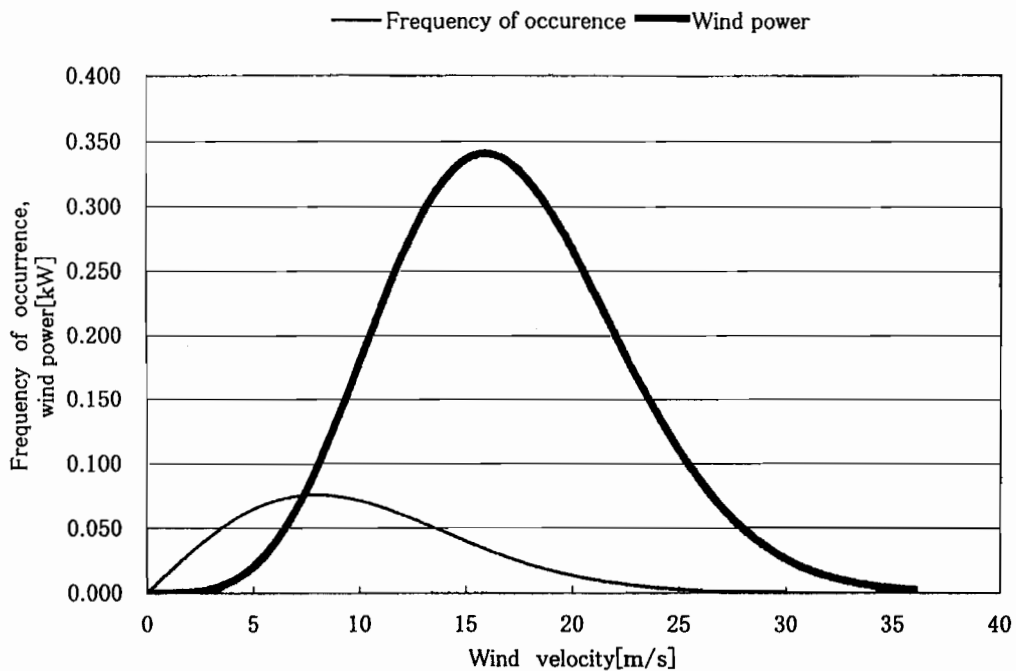


図 3.13 平均風速 10m/s の風速の出現頻度分布, 風速の出現頻度を考慮した風力エネルギーの分布

(3)風力発電装置の設置場所と仕様, 風力発電量

風力発電装置の翼直径, 翼枚数, 設置場所は一般配置図を基に, 風力エネルギーを十分利用できる場所に, 運航や荷役の妨げにならないように検討した。

図 3.14 に風力発電装置の設置場所を示す。甲板上後部にプロペラ形の翼直径 4.0m, 翼枚数 2 枚, ブレード中心高さ 6.5m, 定格出力 10.3kW の風力発電装置を 1 基設置するように仮定した。図 3.15 に風力発電システムの出力特性を示す。定格風速時, 風力発電システムの定格出力は 10.3kW になった。

導入を仮定した風力発電システムからの風力発電電力量はその出力特性を基に, (2.1) 式を用いて計算した。計算の結果, 推定風力発電電力量は 1 時間あたり最大 8.5kWh, 平均 3.0kWh になった。

風力発電装置 10.3kW×1 基

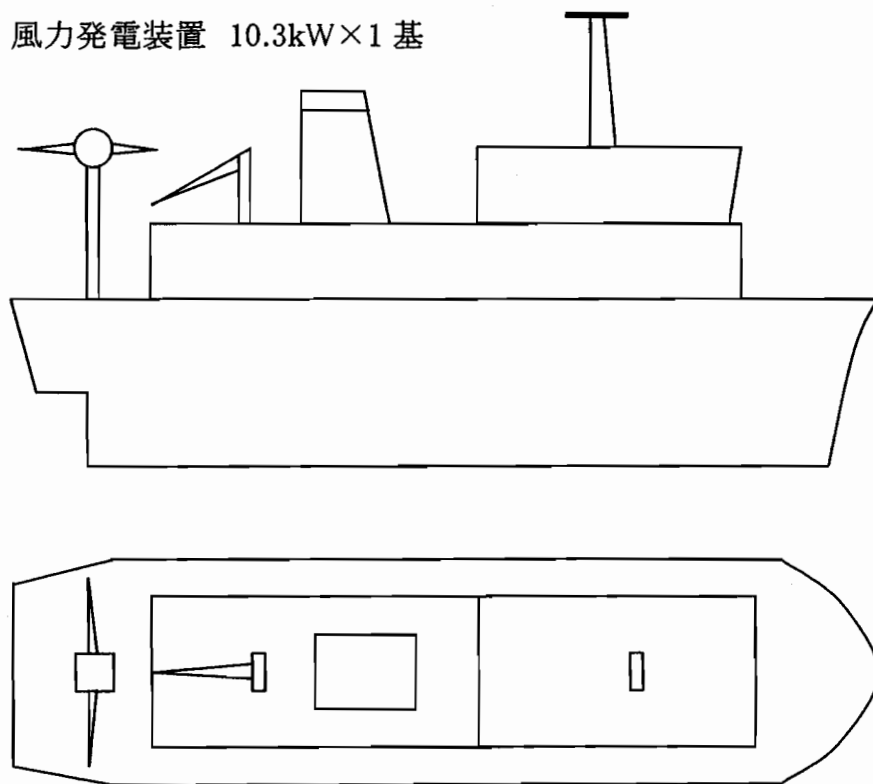


図 3.14 風力発電装置の設置場所

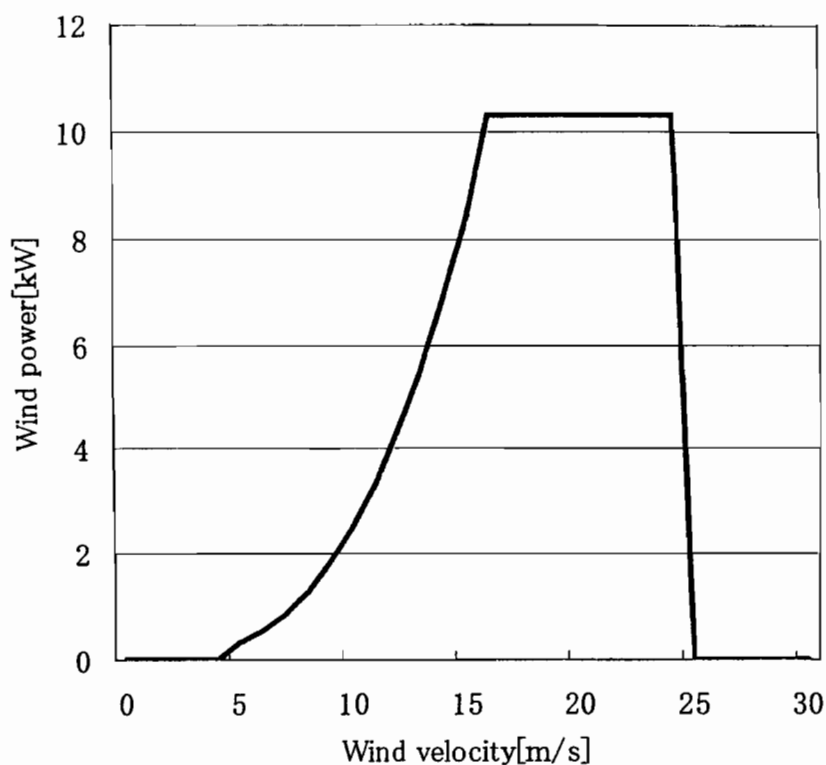


図 3.15 風力発電システムの出力特性

(4)電源システムの構成

推定風力発電電力量と使用電力量を比較すると、常に使用電力量が風力発電電力量より多い。したがって、図 3.16 に示すように風力発電装置からの電力を単純連系方式にて供給する構成にした。推定風力発電電力量と使用電力量から、風力発電システムによって船内に供給できる電力量の割合を計算した。風力発電量の使用電力量に占める割合は最大 12.9%、平均 3.9%になった。

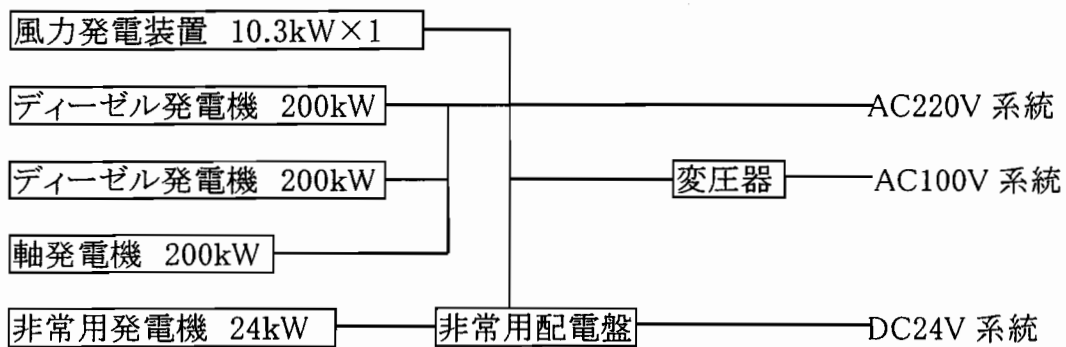


図 3.16 風力発電システムを導入した電源システム

3.3.3 風力発電システムの重量及び空気抵抗の主機関出力への影響

風力発電システムの重量の主機関出力への影響について、対象船舶の場合、船体の重量が約 0.5ton 増加し、排水量等曲線図を用いて浸水表面積を求めると、0.06%増加する。浸水表面積と主機関出力は比例するが、浸水表面積の増加率が微少であるので、主機関出力には影響ないとする。

風力発電装置に働く空気抵抗の主機関出力への影響について、空気抵抗による主機関出力の増加量は、風速の出現頻度を考慮に入れた(2.7)式を用いて計算した。

計算の結果、風速 19.5m/s の風が船首から吹いた時、1 時間あたり最大 4.1 kWhの主機関出力の負担になるが、風力発電電力量は 1 時間あたり 8.2kWh になった。このときの発電用ディーゼル機関の燃料消費量は 1.6kg/h削減され、主機関の燃料消費量は 0.8kg/h増加し、全体で燃料消費量は 0.8kg/h削減され、省エネルギー効果が期待されることが明らかになった。

3.3.4 省エネルギー及び大気汚染物質削減効果

現行電源システムと、風力発電システムを導入した電源システムの発電用ディーゼル機関及び主機関の燃料消費量、 NO_x 、 SO_x 排出量を求め比較を行い、風力発電システムを導入した電源システムの省エネルギー及び大気汚染物質削減効果について考察した。

燃料消費量は機関ログブックに記載されている発電用ディーゼル機関及び主機関の出力と燃料消費量からそれらの特性を作成した。図 3.17 に発電用ディーゼル機関出力と燃料消費量の特性を、図 3.18 に主機関出力と燃料消費量の特性を示す。

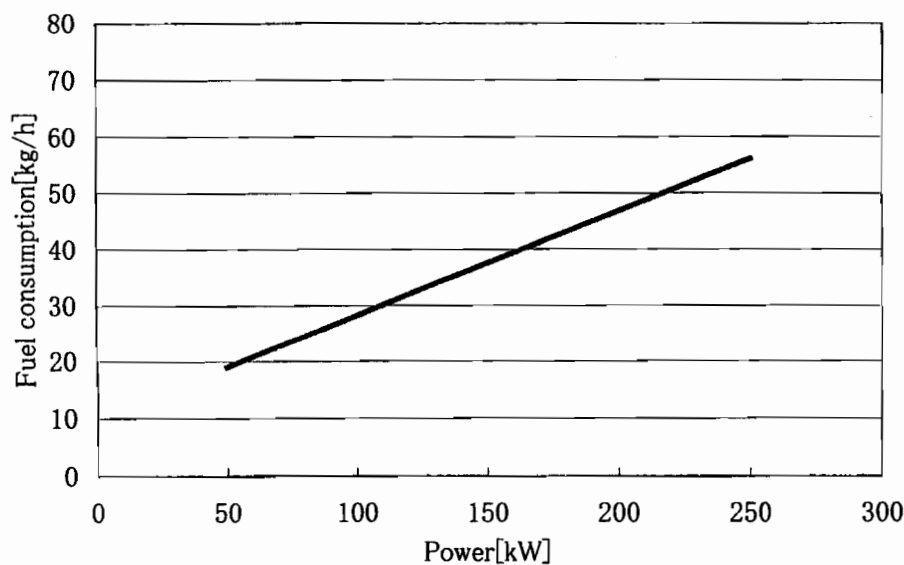


図 3.17 発電用ディーゼル機関出力と燃料消費量の特性

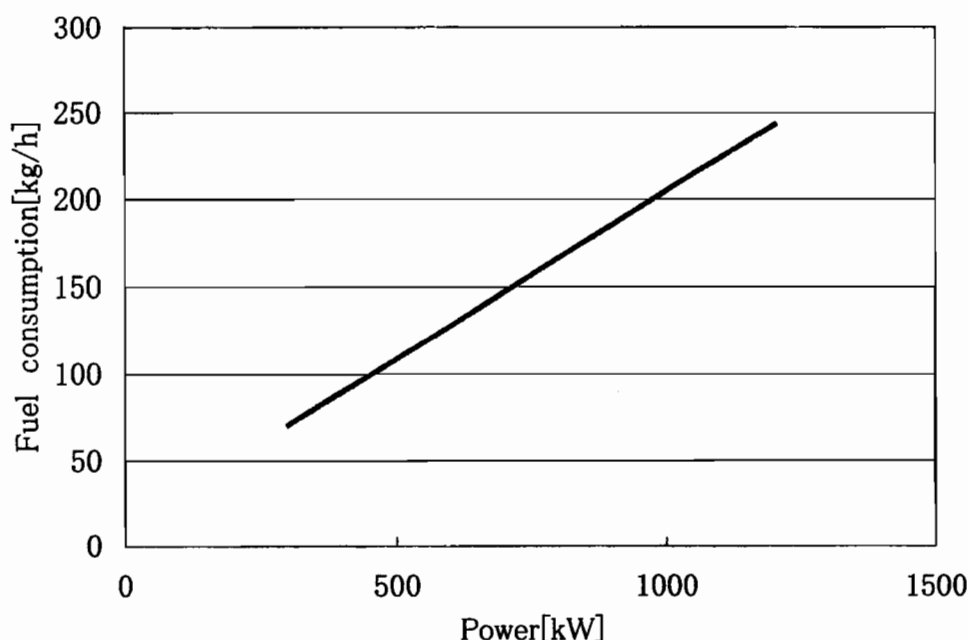


図 3.18 主機関出力と燃料消費量の特性

NO_x排出量は機関負荷率を考慮した(2.11)式を用いて計算し、SO_x排出量は燃料消費量を基に、(2.12)式を用いて計算した。

燃料消費量は現行電源システムでは、平均 187.6kg/h、風力発電システムを導入した電源システムでは平均 187.0kg/h になった。1 時間あたり 0.6kg、対象日全体で 178.4kg 削減が期待できる。

NO_x排出量は現行電源システムでは、平均 10.3kg/h、風力発電システムを導入した電源システムでは平均 10.2kg/h になった。1 時間あたり 0.1kg、対象日全体で 29.7kg の削減が期待できる。

SO_x 排出量は現行電源システムでは、平均 0.338kg/h、風力発電システムを導入した電源システムでは平均 0.337kg/h になった。1 時間あたり 0.001kg、対象日全体で 0.32kg の削減が期待できる。

3.4 まとめ

第 2 章で述べた導入手順と評価方法を基に、大型船舶と小型船舶に分けて、風力発電システムの船舶電源への導入のケーススタディを行った。大型船舶の対象とした外航石炭専用船の場合、甲板上に定格出力 12.4kW の風力発電機を 12 基設置が可能であり、使用電力量の平均 12.9% 供給できる結果になった。小型船舶については練習船“深江丸”を対象とした。深江丸の場合、甲板上に定格出力 10.3kW の風力発電機を 1 基設置が可能であり、使用電力量の平均 3.9% 供給できる結果になった。

いずれの場合も、風力発電の導入によって燃料消費量及び、 NO_x 、 SO_x 排出量削減効果が得られる結果になった。しかし、本章にて検討した単純連系方式では風力発電電力量に相当する分が削減できるだけで、対象船舶全体の燃料消費量及び、 NO_x 、 SO_x 排出量に対する比率は大きなものでないことが分かった。

大きな燃料消費量及び、 NO_x 、 SO_x 排出量削減効果は得られないが、風況の調査結果から、風力発電の利用は可能であり、主電源の補助として使用できると考える。そこで、次章は、海上の自然エネルギーの有効利用を拡大し、風力発電のみならず、太陽光発電を併せて導入する場合について検討を行う。

第4章 船舶電源への風力及び太陽光発電 システム導入の検討と評価

4.1 はじめに

本章では、海上の自然エネルギーの有効利用を目的とし、風力発電と太陽光発電を併せて導入した電源システムの検討を行った。まず、太陽光発電を導入した電源システムの検討を行うため、船上に設置した太陽電池の発電電力の推算法について考察を行った。そして、それを用いて、風力発電と太陽光発電を導入した場合について、前章にて対象とした、大型石炭専用船を例にケーススタディを行い、燃料消費量及び、 NO_x 、 SO_x 排出量削減効果について評価を行った。

4.2 船上に設置した太陽電池からの発電電力の推算法

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。そこで、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提案し、その方法による誤差を検証した。そして、その推算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。

4.2.1 日射量推算法

(1)日射量推算の手順

提案する日射量推算の手順を図 4.1 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、実際の大気では0.6~0.8の範囲であるが⁽³⁷⁾、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、本節にて用いる日射量は、太陽からの直達日射及び散乱日射を合わせた、水平面全天日射量を示す。

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⁽³⁸⁾に合わせ、表 4.1 に示すように、全天が隙間な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、本手法によって、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ことができる。

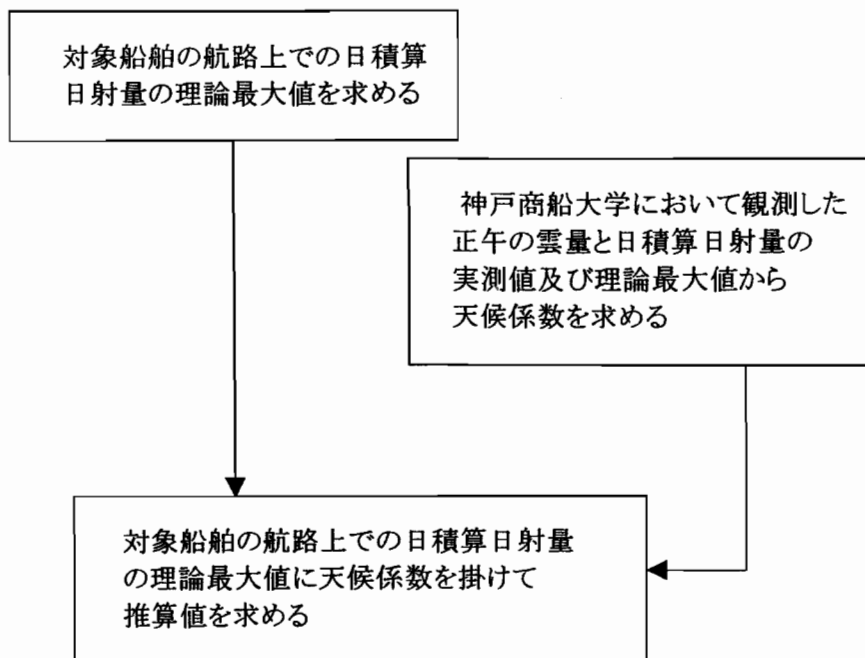


図 4.1 提案する日射量推算の手順

表 4.1 雲量の割合と天候の関係

雲量	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) 日積算日射量

日射量瞬時値の快晴時の理論最大値は次式⁽³⁷⁾を用いて計算した。

$$H = I_o \sinh A^{\operatorname{cosec} h} + \frac{I_o \sinh h (1 - A^{\operatorname{cosec} h})}{2(1 - 1.4 \ln A)} \quad (4.1)$$

ここで,

$$\sinh = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega \quad (4.2)$$

ただし, H : 日射量瞬時値 [kW/m^2]

I_o : 大気外日射強度 [kW/m^2],

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

h : 太陽高度

A : 大気透過率, 最大値を求めるため $A=0.8$ 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。

$$\delta = 23.45 \sin \frac{360(284 + n)}{365} \quad (4.3)$$

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, (4.1)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。

(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 4.2 に示す様に相関関係がある事が分かった。ここで、図 4.2 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 4.1 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。本手法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 4.2 に示す。

$$\text{天候係数} = \frac{\text{日積算日射量の実測値}[\text{kWh/m}^2]}{\text{日積算日射量の理論最大値}[\text{kWh/m}^2]} \quad (4.4)$$

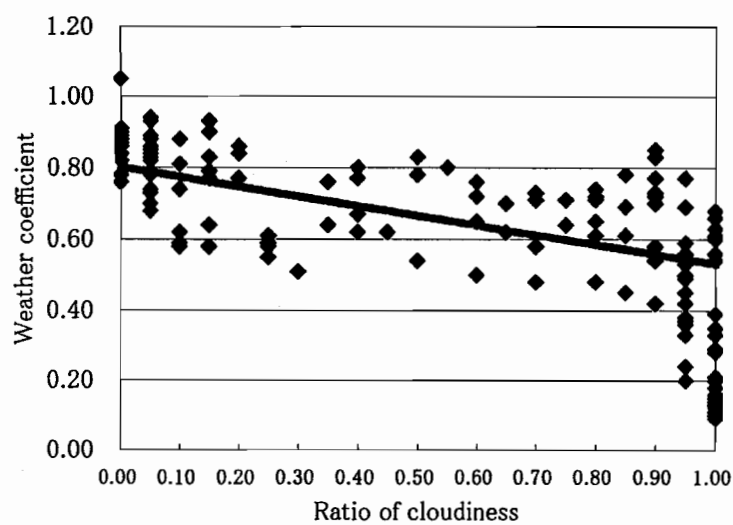


図 4.2 雲量の割合と日積算日射量の理論最大値に対する実測値の比率

表 4.2 天候係数

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

4.2.2 陸上における日射量推算結果

提案した手法によって、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 4.3 と表 4.4 に示す。

1 日あたりの平均値は、潮岬の場合、実測値 4.24kWh/m^2 に対して推算値が 3.92kWh/m^2 、誤差が -0.32kWh/m^2 であり、那覇の場合、実測値 4.06kWh/m^2 に対して推算値が 4.08kWh/m^2 、誤差が 0.02kWh/m^2 になった。誤差の標準偏差は、潮岬の場合 1.31kWh/m^2 、那覇の場合 1.16kWh/m^2 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る時など誤差が大きくなると考える。

上述のように 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 $-23.8\sim+10.0\%$ 、那覇の場合 $-14.3\sim+19.4\%$ になり、本手法には、それくらいの誤差を含む可能性があると考ええる。

表 4.3 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

表 4.4 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

4.2.3 航路上の日射量推算結果

(1) データ収集の対象航路と船舶

提案した手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 4.3 に対象船舶の大まか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第 3 章にて対象とした石炭専用船(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力 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、航海速力 22.8 ノットで約 2 ヶ月間かけて往復航海している。

日射量推算の準備作業として、まず、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 4.1 に示すよう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。

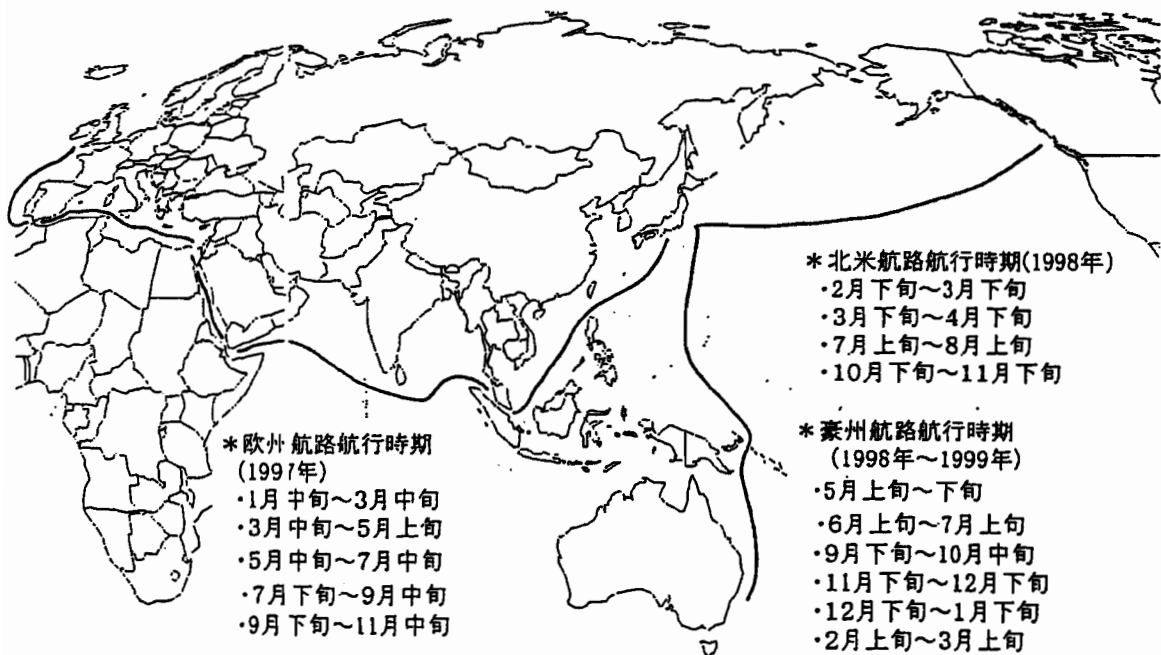


図 4.3 航路及び航行時期

(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 4.5 に示す。北米航路では天候 o の日が多く，他の天候 r, 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。

表 4.5 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

(3) 日射量推算結果

提案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 4.4 から図 4.6に示す。計算の結果、日積算日射量は北米航路では平均 2.5kWh/m^2 、豪州航路では平均 4.2kWh/m^2 、欧州航路では平均 4.5kWh/m^2 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ためであると考えられる。また、季節別に比較すると、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ので、その傾向が著しいことが分かった。

提案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ことは、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。

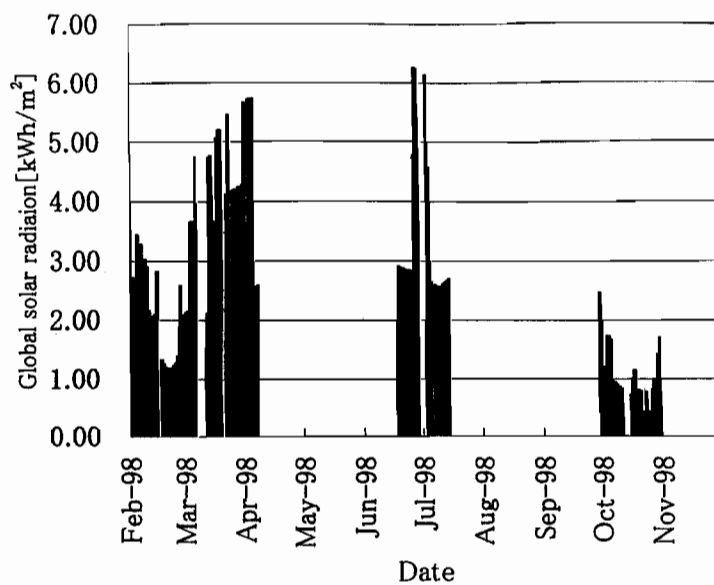


図 4.4 北米航路上の日積算日射量の推算値

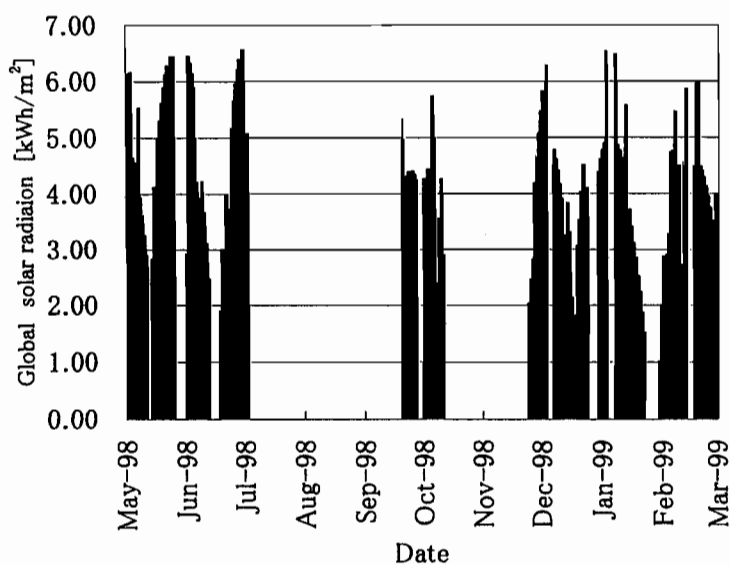


図 4.5 豪州航路上の日積算日射量の推算値

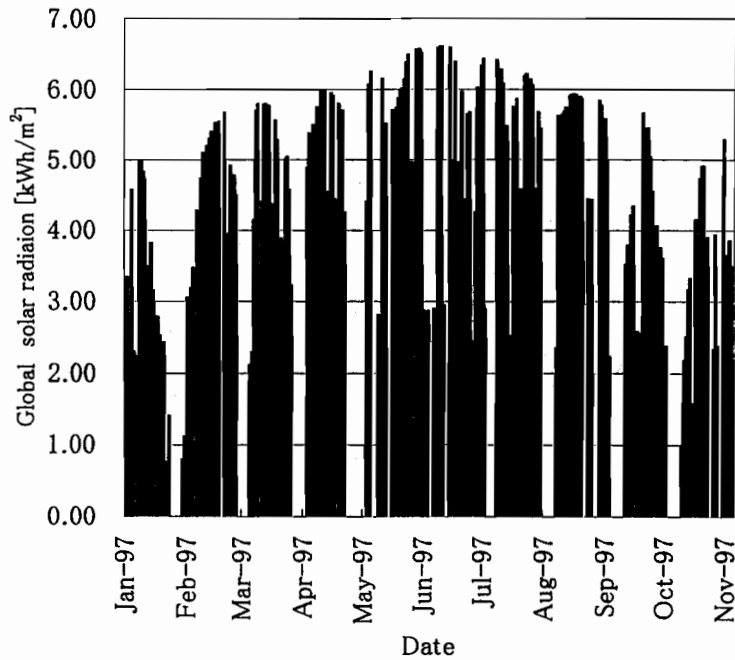


図 4.6 欧州航路上の日積算日射量の推算値

4.2.4 太陽光発電電力量の推算結果

前節にて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1m²あたりの発電電力量を次式によって計算した⁽³⁹⁾。

$$E_p = H_A \eta_s K \quad (4.5)$$

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⁽³⁹⁾。

K : 総合設計係数, 本研究では $K = 0.90$ とする⁽³⁹⁾。

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ことは, 北米航路を航行する船舶に比べ有効であることが分かった。

4.3 風力及び太陽光発電システムの大型船舶への導入のケーススタディ

太陽光発電電力量の推算結果を基に, 風力発電と太陽光発電を導入した場合について, 第 3 章にて対象とした大型石炭専用船を例にケーススタディを行い, 燃料消費量及び, NO_x , SO_x 排出量削減効果について評価した。

4.3.1 太陽電池アレイの設置場所, 設置面積

第 3 章では大型石炭専用船の甲板上の各ハッチ間に, プロペラ形の翼直径 6m, 翼枚数 2 枚, ブレード中心高さ 7m, 定格出力 12.4kWの風力発電装置を 12 基設置するように仮定したが, それらに太陽光発電システムを付加するように, 太陽電池アレイの設置場所を検討した。

太陽電池アレイの設置場所は, 風力発電装置と同様, 船体の一般配置図を基に, 面積を最大限拡大し, 荷役や操船の妨げとならないように検討した。甲板上の最前部と最後部のハッチ上に 240m^2 の太陽電池アレイと, 中央部の 5 枚のハッチ上に 285m^2 の太陽電池アレイの設置を仮定した。太陽電池アレイの設置総面積は 1905m^2 になった。図 4.7 に風力発電装置及び太陽電池アレイの設置場所を示す。

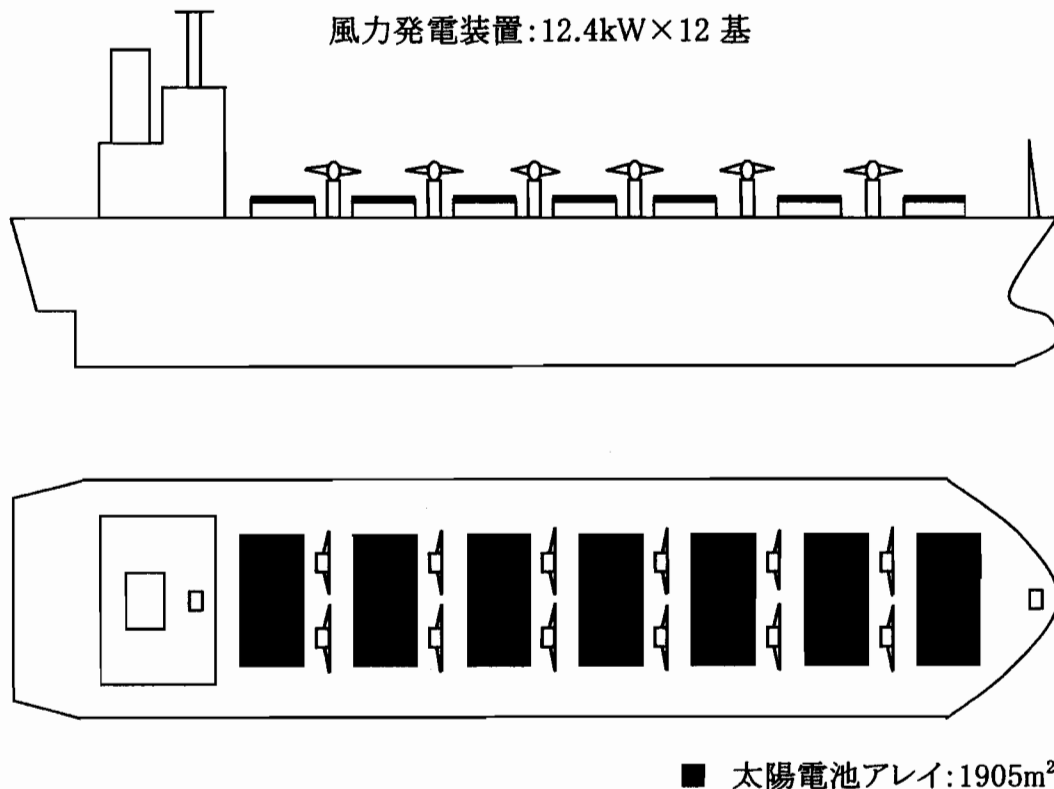


図 4.7 風力発電装置及び太陽電池アレイの設置場所

4.3.2 風力発電及び太陽光発電電力量

導入を仮定した太陽光発電システムからの発電電力量は、前節で求めた対象船舶の航路上の日積算日射量を基に、(4.5)式を用いて計算した。計算の結果、推定太陽光発電電力量は最大 1498.8kWh/day, 平均 813.4kWh/day になった。

第 3 章にて求めた風力発電電力量と太陽光発電電力量を合計すると、最大 3564.5kWh/day, 平均 1777.8kWh/day の発電電力量が見込まれる結果になった。

4.3.3 電源システムの構成

推定風力及び太陽光発電電力量から 1 時間あたり最大 148.5kWh, 平均 74.1 kWh の電力量が見込まれる。使用電力量は機関ログブックから, 1 時間あたり最大 383kWh, 最小 259kWh, 平均 320kWh であるので, 常に使用電力量が風力発電電力量より多い。したがって, 図 4.8 に示すように風力及び太陽光発電装置からの電力を単純連系方式にて供給する構成にした。また, 対象船舶の電力調査表から, AC100V 系統の需要電力量は 1 時間あたり 50kWh であり, 風力及び太陽光発電電力を AC100V 系統に供給すると, 余剰電力が発生する可能性があるため, AC440V 系統に供給するシステムにした。

推定風力及び太陽光発電電力量と使用電力量から, 風力及び太陽光発電システムによって船内に供給できる電力量の割合を計算した。計算の結果, 風力及び太陽光発電システムから使用電力量の平均 23.4%の供給が見込まれる。

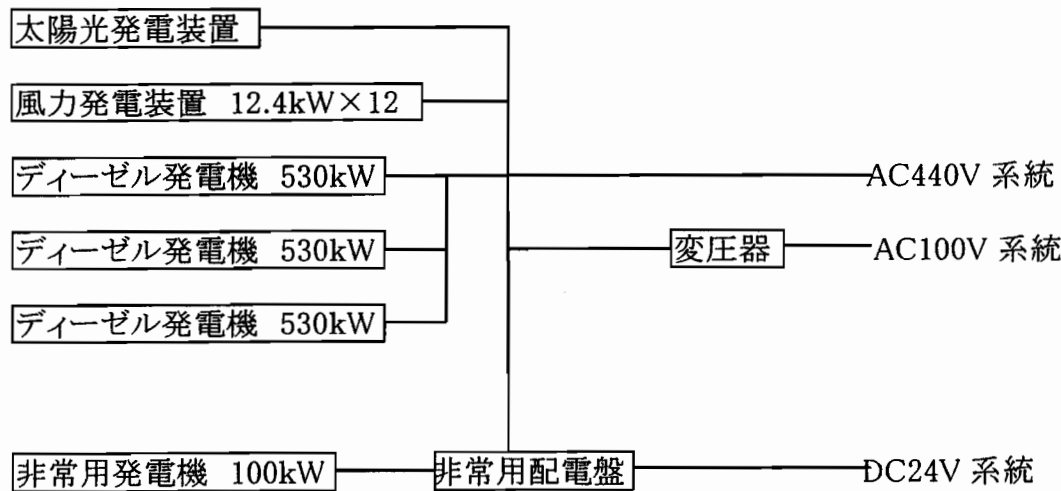


図 4.8 風力及び太陽光発電システムを導入した電源システム

4.3.4 風力発電及び太陽光発電システムの重量の主機関出力への影響

風力発電システムと太陽光発電システムの重量の主機関出力への影響について、第3章にて求めた結果を基に考察すると、船体の重量は約30ton増加し、排水量等曲線図を用いて浸水表面積を求めると、0.015%増加する。浸水表面積と主機関出力は比例するが、浸水表面積の増加率が微少であるので、主機関出力には影響ないと考える。

4.3.5 省エネルギー及び大気汚染物質削減効果

風力発電システムと太陽光発電システムを併せて導入した場合の、燃料消費量、 NO_x 、 SO_x 排出量削減効果を評価するため、風力発電及び太陽光発電システムを導入した電源システムの発電用ディーゼル機関及び主機関の燃料消費量、 NO_x 、 SO_x 排出量を求め、現行電源システムとの比較を行った。

燃料消費量は図3.9と図3.10に示した発電用ディーゼル機関出力及び主機関出力と燃料消費量の特性を基に計算し、 NO_x 排出量は機関負荷率を考慮した(2.11)式を用いて計算し、 SO_x 排出量は燃料消費量を基に、(2.12)式を用いて計算した。

燃料消費量は現行電源システムでは、平均1764.0kg/h、風力発電及び太陽光発電システムを導入した電源システムでは平均1749.6kg/hになった。1日あたり345.6kg、対象日全体で96.8tonの削減が期待できる。

NO_x 排出量は現行電源システムでは、平均149.7kg/h、風力発電及び太陽光発電システムを導入した電源システムでは平均149.0kg/hになった。1日あたり16.8kg、対象日全体で4.7tonの削減が期待できる。

SO_x 排出量は現行電源システムでは、平均52.9kg/h、風力発電及び太陽光

発電システムを導入した電源システムでは平均 52.5kg/h になった。1 日あたり 9.6kg, 対象日全体で 2.7ton の削減が期待できる。

4.4 まとめ

海上の自然エネルギーの有効利用を目的とし、風力発電と太陽光発電を併せて導入した電源システムの検討を行った。まず、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し、太陽光発電電力量を計算する簡便な方法を提案した。航路別の日積算日射量を求めると、北米航路では平均 2.5kWh/m², 豪州航路では平均 4.2kWh/m², 欧州航路では平均 4.5kWh/m²になった。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1m²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ため、多少の誤差が生じると考えられるが、提案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。

次に、太陽光発電電力量の推算結果を基に、風力発電と太陽光発電を導入した場合について、第 3 章にて対象とした大型石炭専用船を例にケーススタディを行い、燃料消費量及び、NO_x, SO_x 排出量削減効果について評価した。

対象船舶の場合、定格出力 12.4kW, 12 基の風力発電システムに併用し、甲板上に 1905m² の太陽電池アレイの設置が可能である結果になった。提案した日射量推算法を基に、航海中の太陽光発電電力量を求め、風力発電電力量と合計した結果、風力及び太陽光発電システムによって、使用電力量の平均 23.4%の

供給が可能であることが分かった。

発電用ディーゼル機関と主機関の燃料消費量及び、 NO_x 、 SO_x 排出量を比較した結果、風力発電システムに太陽光発電システムを併用する事によってそれぞれの削減効果を高めることができたが、本節にて検討した単純連系方式では風力及び太陽光発電電力量に相当する分が削減できるだけで、対象船舶全体の燃料消費量及び、 NO_x 、 SO_x 排出量に対する比率は大きなものでないことが分かった。しかし、海上の自然エネルギーの有効利用という観点から、風力発電や太陽光発電を主電源の補助として使用可能であり、その運用方法を工夫すれば、省エネルギーや、大気汚染物質削減効果を高めると考える。そこで、次章から、風力発電及び太陽光発電とディーゼル発電を統合したハイブリッドシステムととらえ、それぞれの特性を考慮した効果的運用方法を検討し考察した結果について述べる。

第 5 章 船舶電源に導入した風力及び太陽光発電システムの効果的運用方法

5.1 はじめに

前章までは、風力発電、太陽光発電を既存のディーゼル発電システムに単純連系方式で組み込んで利用する場合について検討を行った。本章では、風力発電、太陽光発電とディーゼル発電を統合したハイブリッドシステムととらえ、それぞれの特性を考慮した効果的運用方法について検討する。具体的に、風力及び太陽光発電の船舶電源への導入を想定し、需要側である船内電力の負荷変動特性、及び逆に供給側である風力及び太陽光発電の電力変動特性に着目し、単純連系方式よりも省エネルギー効果が高いと期待される、

- ・風力・太陽光発電電力をピークロード用として利用する運用方法
 - ・太陽光発電電力の予測を用いたハイブリッドシステムの運用方法
- を提案し考察した結果について述べる。

5.2 風力・太陽光発電電力をピークロード用として利用する運用方法

これまでの運用方法は、風力発電や太陽光発電電力を単純連系方式にて、負荷に供給し、発電用ディーゼル機関の燃料消費量を削減するのが目的であったが、本節にて提案する運用方法は、消費電力に比べ小出力の風力発電や太陽光発電電力を消費電力のピークカットとして利用し、発電用ディーゼル機関の定格出力を削減することによって、さらなる燃料消費量削減を目的とする。

本節では、まず、風力や太陽光発電電力を消費電力のピークカットとして利用

する運用方法を考察し提案する。次に、提案した運用方法を検証するため、小型船舶において、計測を行った風速データを用いて計算した風力発電電力及び陸上の実験用太陽光発電装置によって計測した太陽光発電電力を用いて、現行電源システムを基に、風力・太陽光発電システムを併用した電源システムの検討を行う。

最後に、風力・太陽光発電電力を単純連系方式にて、負荷に供給するこれまでの運用方法と、提案する運用方法を用いてシミュレーションを行い、発電用ディーゼル機関の燃料消費量を比較し、提案した運用方法の省エネルギー効果について評価を行う。

5.2.1 運用方法とシステム構成

これまでの運用方法の場合、蓄電池を用いず、風力及び太陽光発電システムの発電電力を単純連系方式にて負荷に供給し、風力発電電力の供給不足分はディーゼル発電機によって供給していたが、消費電力に対する風力発電及び太陽光発電電力の比率が少ないため、発電用ディーゼル機関の燃料消費量削減効果が小さかった。また、船舶の消費電力は、断続運転する機器によって変動が大きく、特に停泊中と航海中の消費電力を比較すると、その差が著しい。そこで、本研究では、消費電力の変動に着目し、供給比率の少ない自然エネルギーの発電電力を効果的に利用し、発電用ディーゼル機関の燃料消費量を効果的に削減する運用方法を提案する。

提案する運用方法は図 5.1 に示すように、風力発電装置、太陽電池、蓄電池、ディーゼル発電機、インバータによって構成されたシステムを対象とする。その運用方法は、図 5.2 に示すように消費電力 P_{Li} が変動した場合、消費電力 P_{Li} がある

設定電力 P_s 未満時(低負荷時)に、風力・太陽光発電システムによって蓄電池を充電し、消費電力 P_L が P_s 以上時(高負荷時)に風力・太陽光発電システムと蓄電池によって、 P_s を超過する電力を供給する。このように、消費電力のピークカットを行うことにより、発電用ディーゼル機関を小容量化でき、平均負荷率が増加し、燃料消費量を削減することができる。

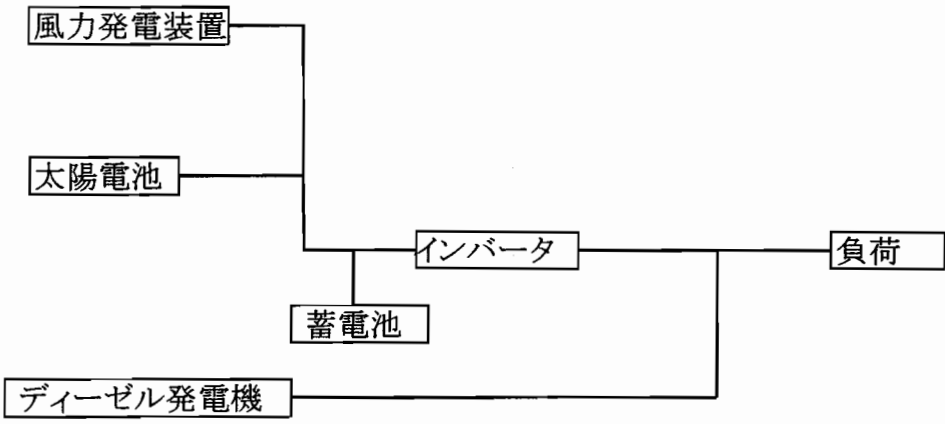


図 5.1 電源システムの構成

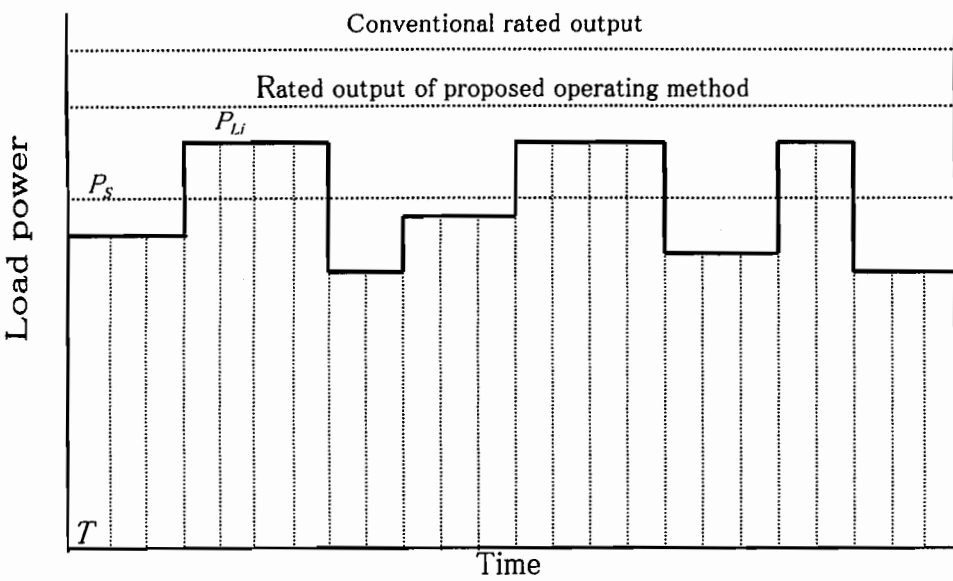


図 5.2 消費電力の変動とピークカットによる発電用ディーゼル機関の定格出力削減効果

5.2.2 ピークカットを行う消費電力設定方法

上述の運用方法を用いる際、ピークカットを行う消費電力を設定する必要がある。よって、図 5.2 を参照にしながらピークカットを行う設定電力 P_s の設定方法を述べる。

設定の検討を行う時間を L とし、その時間を等間隔 T に区切るとすれば、 L は次式によって表される。

$$L = Tn \quad (n \text{ は } 1 \text{ 以上の整数}) \quad (5.1)$$

また、区切った各時間における風力・太陽光発電システムの発電電力を P_{WPj} によって表す。

消費電力 P_{Li} が P_s 未満時、風力・太陽光発電システムの発電電力はすべて蓄電池に充電される。 $0 \leq T \leq Tj (1 \leq j \leq n)$ 時間の総充電電力量 E_{BCj} は蓄電池の充放電効率を η_b とすれば、次式によって表される。

$$E_{BCj} = \sum_{i=1}^j \eta_b \delta P_{WPi} T \quad (5.2)$$

$$\text{ただし, } \delta = 0 \ (P_{Li} \geq P_s), \ \delta = 1 \ (P_{Li} < P_s)$$

一方、ピークカット時 ($P_{Li} \geq P_s$)、 $0 \leq T \leq Tj (1 \leq j \leq n)$ 時間の風力・太陽光発電システムの総発電電力量 E_{WPj} は次式によって表される。

$$E_{WPj} = \sum_{i=1}^j \delta P_{WPi} T \quad (5.3)$$

$$\text{ただし, } \delta = 1 \ (P_{Li} \geq P_s), \ \delta = 0 \ (P_{Li} < P_s)$$

また、ピークカット時 ($P_{Li} \geq P_s$)、 $0 \leq T \leq Tj (1 \leq j \leq n)$ 時間の風力・太陽光発電システム及び蓄電池からの負荷に供給する総電力量 E_{Nj} は次式によって表される。

$$E_{Nj} = \sum_{i=1}^j \delta (P_{Li} - P_s) T \quad (5.4)$$

$$\text{ただし, } \delta = 1 \ (P_{Li} \geq P_s), \ \delta = 0 \ (P_{Li} < P_s)$$

よって、 $Tj (1 \leq j \leq n)$ 時間後の蓄電池の残存電力量 E_{Bj} は、蓄電池の初期電力

量を E_{B0} とすれば次式によって表される。

$$E_{Bj} = E_{B0} + E_{BCj} + E_{WPj} - E_{Nj} \quad (5.5)$$

ここで、 $E_{Bj} < 0$ になれば、蓄電電力量不足のため、安定した電力供給ができなくなる。そこで、すべての $j(1 \leq j \leq n)$ について $E_{Bj} > 0$ になるように風力・太陽光発電電力及び消費電力のデータに基づき E_{B0} と P_s を決定する。

5.2.3 燃料消費量の比較と削減効果の検討

本節では、発電用ディーゼル機関の負荷率と燃料消費率の特性を調査した結果及び仮想風力・太陽光発電電力、消費電力モデルを用いて、風力・太陽光発電システムを用いず発電用ディーゼル機関のみによって電力を供給する運用方法(運用方法 1[Method1]とする)とこれまでの運用方法(運用方法 2[Method2]とする)及び本運用方法(運用方法 3[Method3]とする)の燃料消費量を比較し、運用方法 3 を提案する意義を述べる。

(1)ディーゼル機関の小容量化による燃料消費量削減効果に関する考察

運用方法 1 及び 2 における発電用ディーゼル機関の定格出力 P_{DR1} は、発電用ディーゼル機関の最大負荷率を η_{LF} 、発電機効率を η_g 、消費電力の最大値を P_{LX} とすれば次式によって表される^{(40), (41)}。

$$P_{DR1} = \frac{P_{LX}}{\eta_{LF}\eta_g} \quad (5.6)$$

そして、運用方法 3 における発電用ディーゼル機関の定格出力 P_{DR2} は、 P_s を用いて次式によって表される。

$$P_{DR2} = \frac{P_s}{\eta_{LF}\eta_g} \quad (5.7)$$

P_{DR1} と P_{DR2} を比較すると、消費電力のピークカットによって、 $P_{LX} > P_S$ になるため $P_{DR1} > P_{DR2}$ になり、運用方法 3 によって発電用ディーゼル機関の定格出力が減少し小容量化できることが分かる。

次に、運用方法 3 を用いれば、発電用ディーゼル機関が小容量化し、その平均負荷率の増加によって、運用方法 2 と比較し燃料消費量が削減できる可能性を検証するため、発電用ディーゼル機関メーカーの協力を得て、定格出力 44kW から 132kW までのディーゼル機関の負荷率と燃料消費率の特性を調査した。図 5.3 に調査した特性を基に各機関の燃料消費量を計算し、等機関出力線(破線にて示す)を重ねた結果を示す。図 5.3 から負荷率と燃料消費量の特性は右上がりの直線で表され、各負荷率における燃料消費量は定格出力が小さくなれば、減少する傾向にある。また、各等機関出力線と負荷率及び燃料消費量の特性から、同じ機関出力のとき、小容量の機関ほど、燃料消費量が少ない傾向にある。したがって、運用方法 3 を用いれば、ディーゼル機関が小容量化できるため、平均負荷率が増加し、運用方法 2 と比較して燃料消費量が削減できることが分かる。

図 5.4 には、図 5.3 の特性から求めた各機関の負荷率と相対燃料消費率を示す。図 5.4 から各機関とも負荷率 90%から 100%で相対燃料消費率は最小になり、負荷率が減少するにつれて相対燃料消費率は増加する傾向にある。したがって、運用方法 3 は、風力・太陽光発電電力と蓄電電力によって、消費電力のピークカットを行い、発電用ディーゼル機関を小容量化し、できるだけ高負荷で運転し燃料消費率を減少させることができるため、運用方法 2 と比較して、燃料消費量の削減に有効であることが分かる。

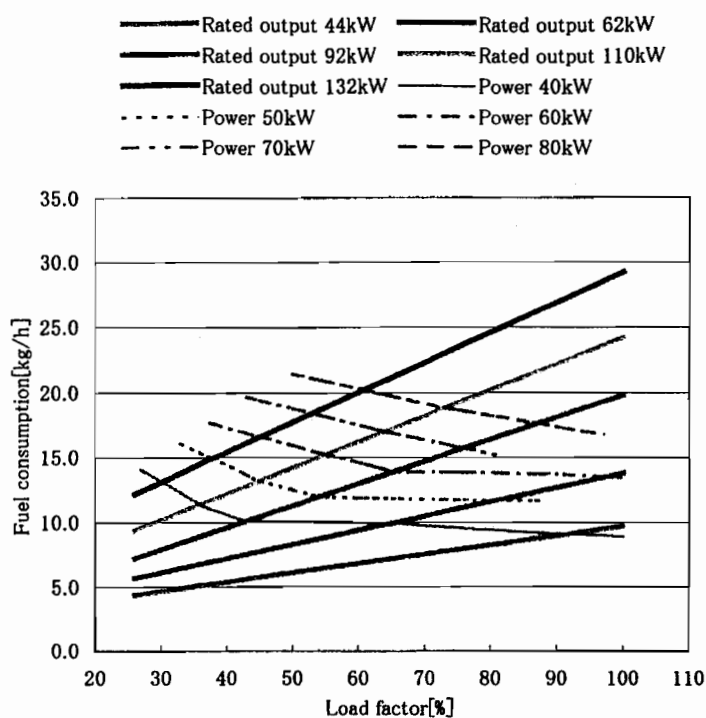


図 5.3 負荷率と燃料消費量の特性

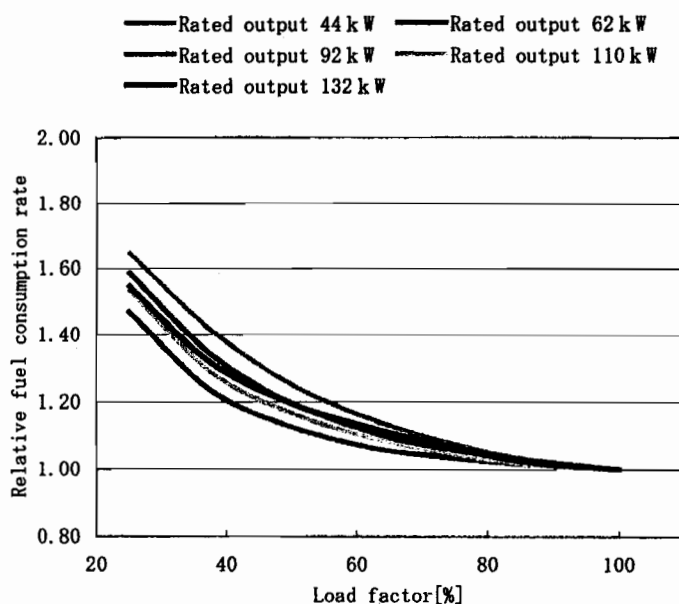


図 5.4 負荷率と相対燃料消費率の特性

(2) 仮想風力・太陽光発電電力、消費電力モデルを用いた燃料消費量の比較

具体的に運用方法 3 を用いた場合の燃料消費量削減効果を示すため、各運用方法の燃料消費量を、以下の要領で設定を行い比較した。

図 5.5 に風力・太陽光発電電力、消費電力モデルを示す。同図は T を 1 時間として 24 時間のモデルである。消費電力は図の様に低負荷時と高負荷時に分かれる。運用方法 1 及び 2 の発電用ディーゼル機関の定格出力 P_{DR1} は図 5.3 に負荷率と燃料消費量の特性を示した 132kW としたため、高負荷時の消費電力 P_{LH} は、(5.6) 式において η_{LF} を 0.85, η_g を 0.92 として^{(40), (41)} 計算すると 103.2kW になる。高負荷の時間は 24 時間中、4 時間から 14 時間まで変化させ検討を行う。この時、消費電力の平均値を 80kW と定めたため、低負荷の時の消費電力 P_{LL} は、高負荷の時間に伴い 75.4kW から 47.5kW まで変化する。一方、風力・太陽光発電電力 P_{WP} は、最初の 5 時間は 0, その後 2 時間毎に 3kW ずつ 12kW まで増えて最大になり、その後 2 時間毎に 3kW ずつ減少し、19 時以降は再び 0 になる。この場合、全消費電力に対する風力・太陽光発電電力は 5% になる。

運用方法 3 のピークカットを行う設定電力 P_s は 5.2.2 節に述べた方法を基に、風力・太陽光発電電力、消費電力の変動から (5.5) 式の蓄電池残存電力量 E_B がすべての時間において $E_B > 0$ になる様に P_s と蓄電池容量を設定した。運用方法 3 の発電用ディーゼル機関の定格出力 P_{DR2} は (5.7) 式を用いて η_{LF} を 0.85, η_g を 0.92 として計算した。また、運用方法 1 及び 2 の燃料消費量は、図 5.3 に示す定格出力 132kW のディーゼル機関の負荷率と燃料消費量の特性から計算し、運用方法 3 の燃料消費量は同図の定格出力 92kW と 132kW のディーゼル機関の負荷率と燃料消費量の特性を補間して、それぞれの定格出力について計算した。

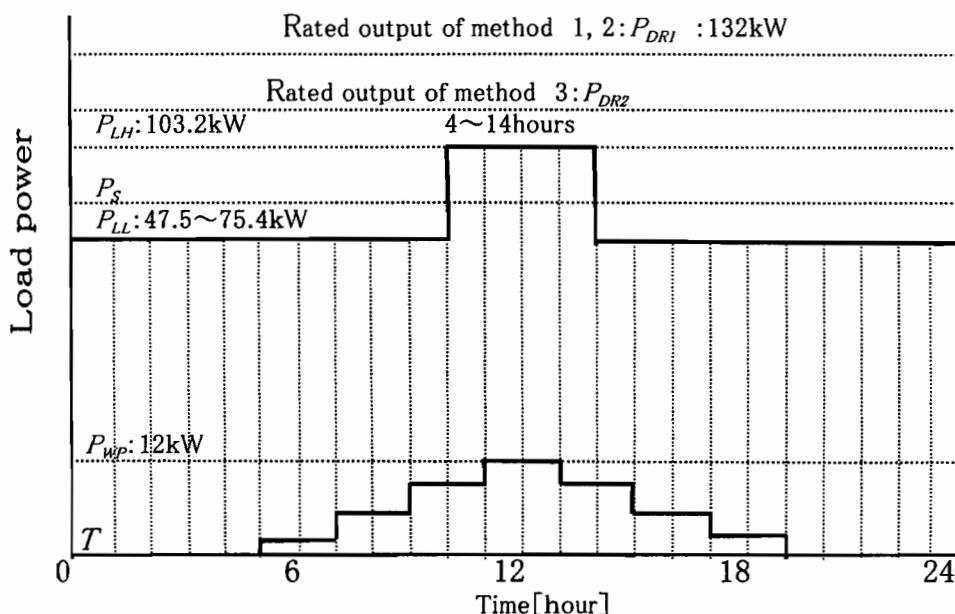


図 5.5 風力・太陽光発電電力，消費電力モデル

図 5.6 に高負荷の時間を変えた場合の各運用方法における発電用ディーゼル機関の定格出力，ピークカットを行う設定電力及び必要な蓄電池容量を示す。図 5.6 から，平均消費電力は同じであるが，高負荷の時間が短時間であるほど， P_s は低く設定され発電用ディーゼル機関を小容量化できることが分かる。ただし，このとき，必要な蓄電池容量は大きくなる。

図 5.7 に運用方法 2 及び 3 における発電用ディーゼル機関の平均負荷率を示す。図 5.7 から運用方法 3 によって，ディーゼル機関の定格出力が減少し小容量化され，平均負荷率が増加したことが分かる。また，図 5.8 に各運用方法の燃料消費量を示す。図 5.8 から，運用方法 2 によって燃料消費量は削減できるが，運用方法 3 を用いれば，さらに燃料消費量の削減が可能になり，高負荷の時間が短時間であるほど，運用方法 3 のディーゼル機関は小容量化され，平均負荷率の増加によって燃料消費量は削減できる傾向があり，高負荷が 4 時間の時，約 3 倍の燃料消費量の削減が期待できる。

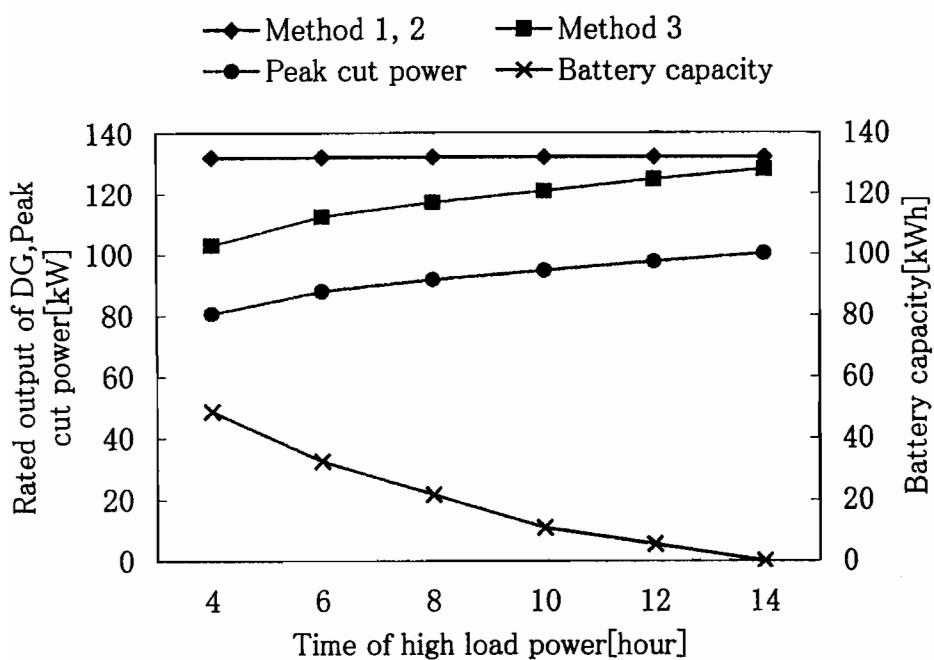


図 5.6 高負荷の時間とディーゼル機関定格出力,
ピークカット設定電力, 蓄電池容量

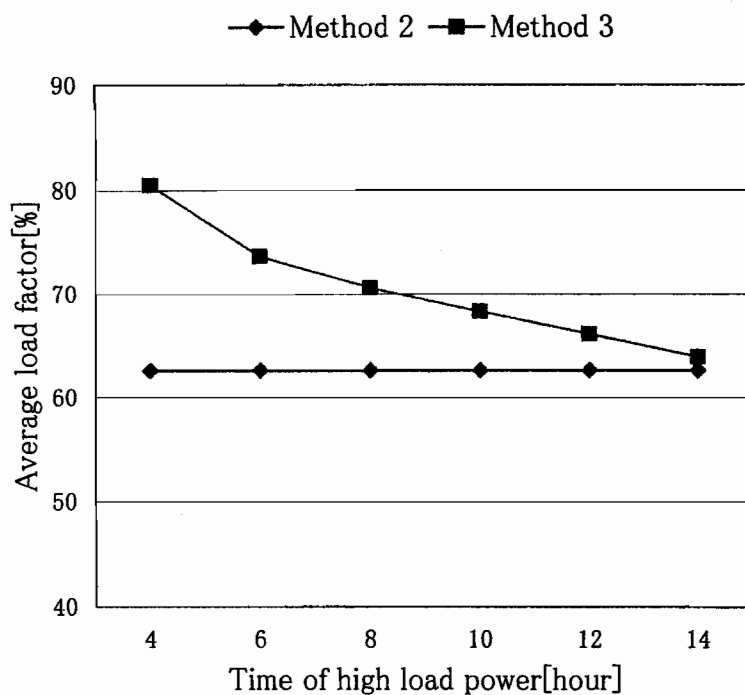


図 5.7 高負荷の時間と平均負荷率

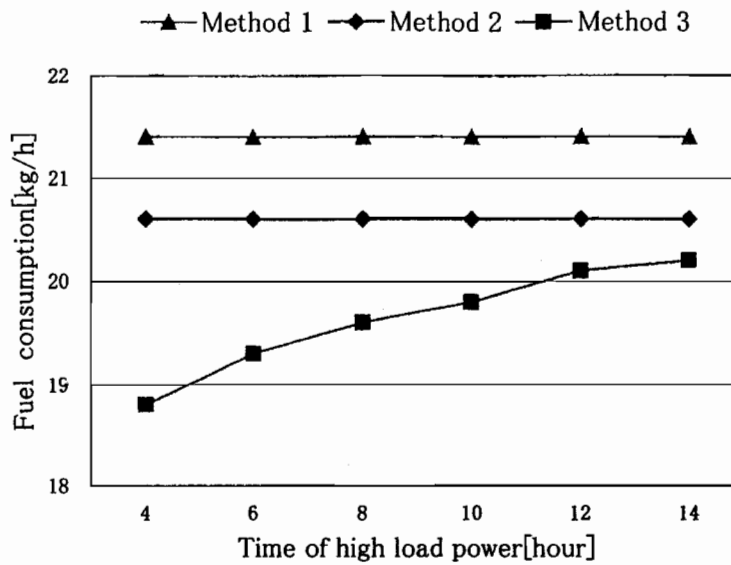


図 5.8 高負荷の時間と燃料消費量

5.2.4 シミュレーションによる運用方法の検証

提案した運用方法を検証するため、小型船舶において計測した風速データを使用し計算した風力発電電力及び陸上の実験用太陽光発電装置によって計測した太陽光発電電力を用いて、風力・太陽光発電システムを導入した電源システムの検討を行った。これを基に、これまでの運用方法と、提案する運用方法を用いてシミュレーションを行い、発電用ディーゼル機関の燃料消費量を比較し、提案した運用方法の省エネルギー効果について評価を行った。

(1)対象船舶

対象とした船舶は大阪湾や瀬戸内海を航海する海技大学校所有の練習船“海技丸”である。海技丸の主要目を表 5.1 に示す。海技丸の運航状態は昼間に航海を行い夜間は停泊している。本研究では、海技丸において 2000 年 8 月 22 日から 25 日までの 4 日間、瀬戸内海を航行した研究航海において、航海中 10 分毎に計測した相対風向、相対風速、消費電力などのデータを使用し、電源システムの検討を行った。

表 5.1 海技丸の主要目

船体	
全長	38.0 m
幅	6.8 m
総トン数	157.0 t
排水量(満載)	394.0 t
航海速力	11.0 knots
主機 ディーゼル機関 1基	
連続最大出力	588 kW
連続回転数	15 s ⁻¹
発電用原動機 ディーゼル機関 1基	
出力	161 kW
回転数	20 s ⁻¹
発電機 三相交流発電機 1基	
電圧	450 V
周波数	60 Hz
容量	150 kW
回転数	20 s ⁻¹
軸発電機	
電圧	450 V
周波数	60 Hz
容量	150 kW
回転数	15 s ⁻¹
蓄電池(非常用電源) 24 V, 300 A/h 2基	

(2) 風力発電装置の仕様と設置場所

海技丸に設置を仮定した風力発電装置は神戸商船大学所有の WESTWIND 1.8kW WINDPOWER GENERATOR である。表 5.2 に風力発電装置の主要目を示す。これを用いて風速、風向、発電機出力を計測し、出力特性を作成した。風力発電装置の出力特性を図 5.9 に示す。

航海中、採取した風速データを基に風速の分布を作成した。図 5.10 に計測した相対風速の分布を示す。図 5.10 から計測した風速は風速 7m/s から 9m/s をピークとし分布していることが分かる。また、夜間停泊時の風速データは、1 時間毎に計測された気象庁のデータを使用した。停泊時の平均風速は 2.3m/s であった。

風力発電装置の設置場所は海技丸の船体の一般配置図を基に、操船や甲板作業の妨げにならず、風を受けやすいように検討した。検討の結果、図 5.11 に示すようにコンパスデッキ後部に決定した。

表 5.2 風力発電装置の主要目

形式	3 ブレードアップウインド
翼直径	3.6 m
カットイン風速	3.0 m/s
定格風速	12.5 m/s
ファールリング風速	17.0 m/s
耐風速	60.0 m/s
定格出力	1.8 kW

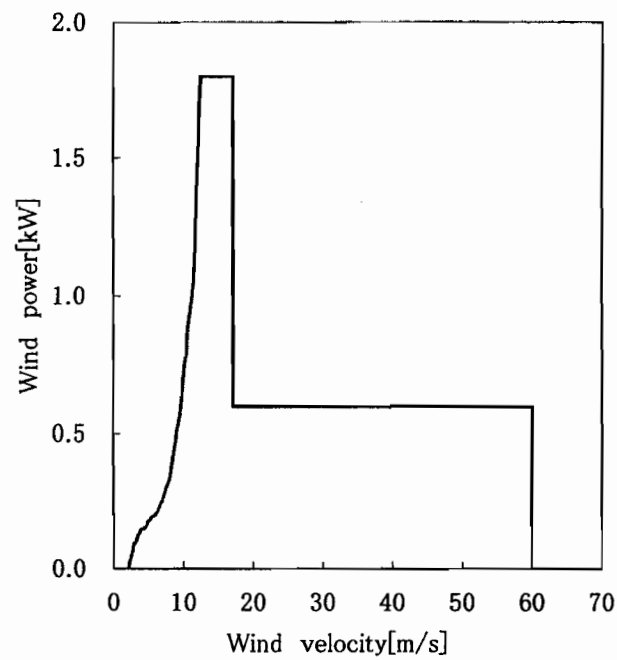


図 5.9 風力発電装置の出力特性

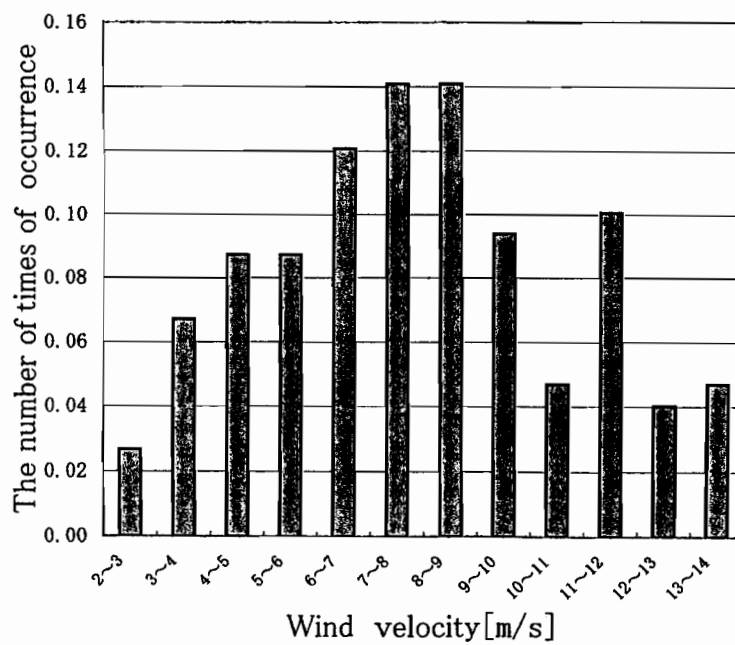


図 5.10 計測した風速値の分布

(3)太陽光発電装置の仕様と設置場所

本研究では神戸商船大学所有の実験用太陽光発電装置によって計測した、研究航海実施期間の太陽光発電電力データを使用した。表 5.3 に実験用太陽光発電装置の主要目を示す。太陽電池アレイの設置場所は図 5.11 に示すようにコンパステッキ前部とボートデッキ後部に決定した。太陽電池アレイの設置総面積は 38m^2 、出力は 4.4kW である。

表 5.3 実験用太陽光発電装置の主要目

太陽電池モジュール	多結晶シリコン
最大出力	$102[\text{W}] \pm 5[\%]$
短絡電流	$3.25[\text{A}]$
開放電圧	$42.5[\text{V}]$
最大出力動作電流	$3.02[\text{A}]$
最大出力動作電圧	$33.8[\text{V}]$
太陽電池アレイ	
総出力	$9.8[\text{kW}]$
最大動作電圧	$270.4[\text{V}]$
最大動作電流	$36.2[\text{A}]$
直列数	8 直列
並列数	12 並列
総モジュール枚数	96 枚
傾斜角度	$15[^\circ]$

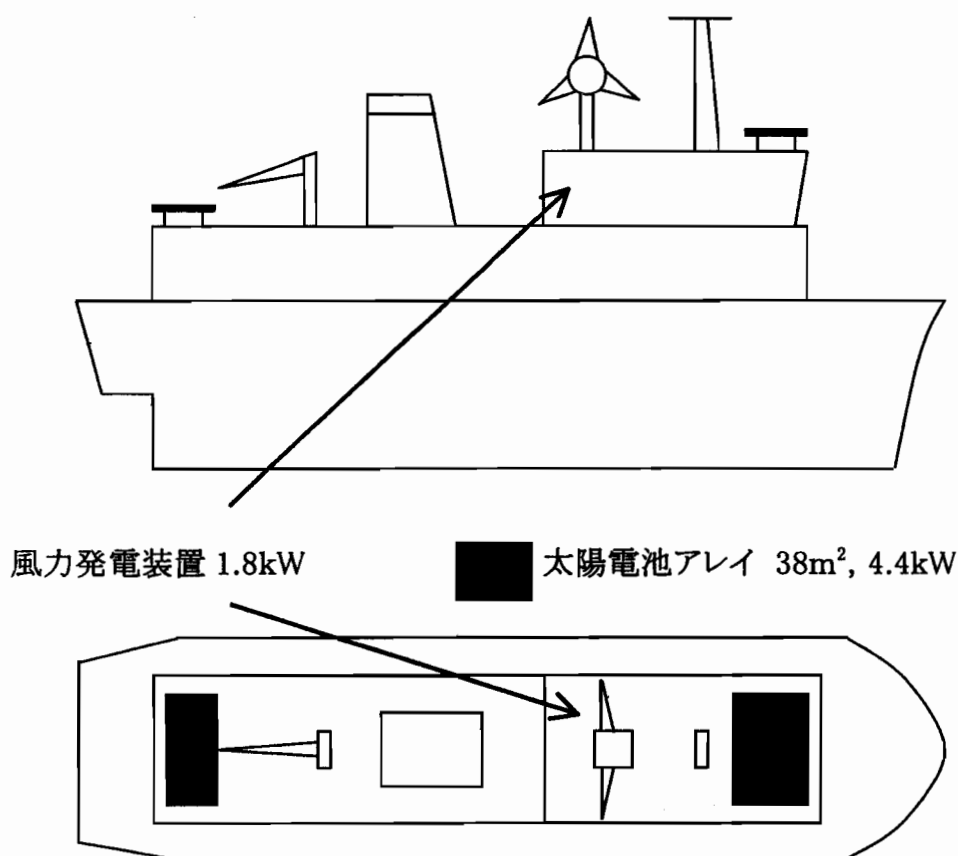


図 5.11 風力発電装置, 太陽電池アレイの設置場所

(4) 風力・太陽光発電電力, 消費電力

航海中の風力発電電力は, 計測した風速データと図 5.9 に示す風力発電装置の出力特性及び図 5.10 に示す相対風速の分布から計算した。風力発電電力は最大 1.80kW, 平均 0.45kW になった。

設置を仮定した太陽電池アレイの太陽光発電電力は, 実験用太陽光発電装置によって計測した電力に面積と傾斜角度の換算を行い計算した。太陽光発電電力は最大 3.20kW, 平均 1.75kW になった。

研究航海が実施された 4 日間の風力・太陽光発電電力, 消費電力を図 5.12 に示す。航海中の風力及び太陽光発電電力は最大 4.45kW, 平均 2.79kW になっ

た。そして、停泊中は最大 2.58kW, 平均 0.31kW になった。

消費電力は航海中, 最大 48.8kW, 最小 25.8kW, 平均 32.9kW であった。また, 停泊中は一定の 8.0kW であった。図 5.12 から航海中と停泊中では, かなり変動があることが分かる。

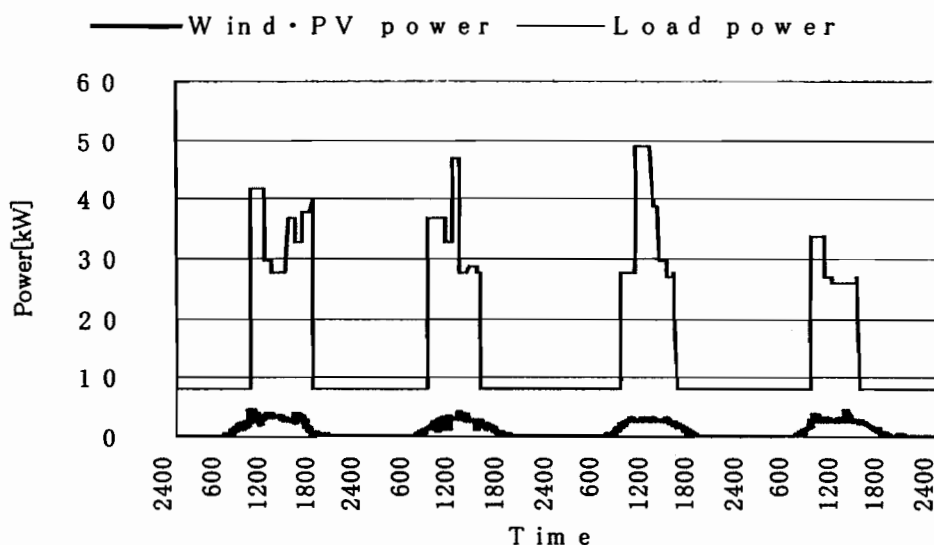


図 5.12 風力・太陽光発電電力, 消費電力

(5) シミュレーションの条件

シミュレーションの前提条件として, 電源システムは図 5.1 に示した機器で構成され, これまでの運用方法を用いる場合, 蓄電池は使用しないと仮定した。ここで, 発電用ディーゼル機関の定格出力は(5.6)式によって, η_{LF} を 0.85, η_e を 0.92 として計算した。計算の結果, 現行の発電用ディーゼル機関の定格出力は 62kW になった。また, 蓄電電力量は(5.2)式における蓄電池の充放電効率 η_b を 0.90 として計算した。

(6)シミュレーション結果

提案した運用方法を用いる場合、ピークカットを行う消費電力を設定する必要があるため、5.2.2節に述べたように設定を行った。その結果、ピークカットを行う設定電力は 34kW になった。そして、発電用ディーゼル機関の定格出力は(5.7)式によって計算した結果、現行の 62kW から 44kW になり、29%小容量化できた。また、このときの蓄電池容量は蓄電池の残存電力量から 30kWh になった。

各運用方法を用いた場合の燃料消費量は図 5.3 に示した定格出力 62kW と 44kW のディーゼル機関の負荷率と燃料消費量の特性を用いて計算した。その結果、ディーゼル発電機のみを使用する現行の電源システムでは、平均 6.9kg/h、これまでの運用方法の場合、平均 6.6kg/h、提案した運用方法の場合、平均 6.0kg/h になった。提案した運用方法を用いると消費電力のピークカットによって、発電用ディーゼル機関の定格出力が減少し、負荷率が増加したため、これまでの運用方法に比べ、燃料消費量を削減できる結果になった。

5.3 太陽光発電電力予測を用いたハイブリッドシステムの運用方法

本節では、太陽光発電とディーゼル発電を統合したハイブリッドシステムにおいて、供給側である太陽光発電の電力変動特性に着目し、太陽光発電の発電電力の予測を用いたハイブリッドシステムの運用方法を提案する。ここで、提案する運用方法は交通艇やヨットなど、太陽光発電によってほぼ消費電力を供給できる場合を対象とする。

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。

5.3.1 システム構成と前提条件

提案する運用方法は、図5.13に示すシステムを対象とする。システムは、負荷、太陽電池、蓄電池、双方向インバータ、及びディーゼル発電機によって構成される。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、本研究で用いた各装置のモデルと前提条件について説明する。

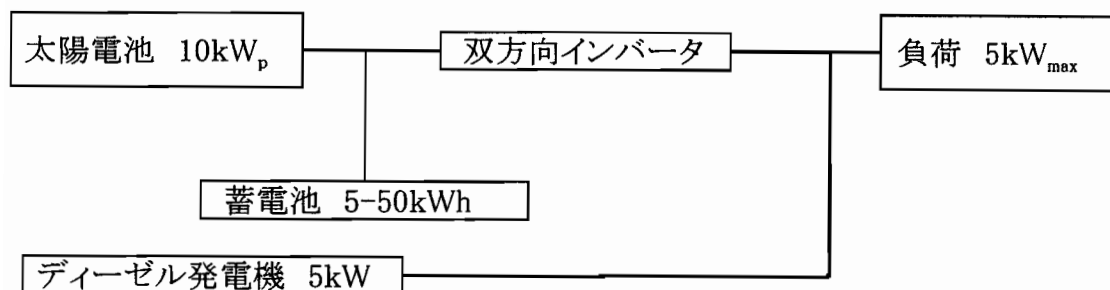


図5.13 システムのブロック図

(1) 太陽電池

太陽電池は、表5. 3に示した神戸商船大学所有の実験用太陽光発電装置の太陽電池をモデルとし、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。

(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、全需要電力量を賄うことができず、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5.14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5.14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(42) 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5.14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5.14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。

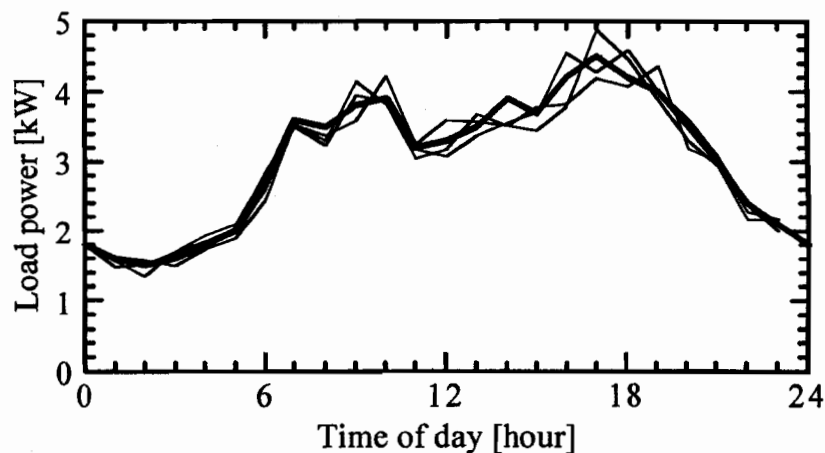


図5.14 日負荷曲線

(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^{(43), (44)}, ここでは、計算の簡略化のため、充放電効率 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。

(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量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出力量 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。

(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5.15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。ここで、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 とするとき、 $p_d = P_d / P_{d,max}$, $c_f = C / C_{f,max}$ とおく。このとき、 p_d と c_f との関係は、

$$c_f = \eta_d p_d + (1 - \eta_d) \quad (5.8)$$

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。

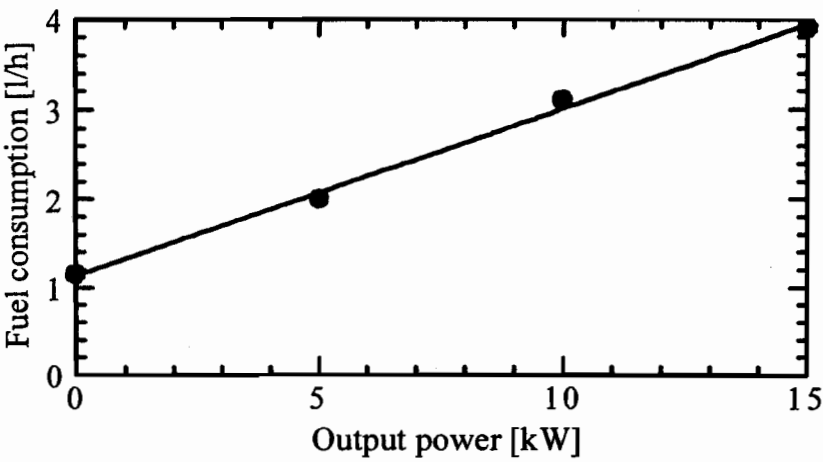


図 5.15 ディーゼル発電機の燃料消費量

5.3.2 太陽光発電電力予測を用いたシステム運用方法

(1) 予測を用いない場合の運用方法

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。

①低充電電力方式

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(31)のConstant Charge-Level法や文献(28)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。

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(30)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。

(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_n は、(5.8) 式を用いて、

$$c_n = \left\{ \eta_d \sum_{i=0}^{n-1} p_l(i) + (1-\eta_d)n \right\} T \quad (5.9)$$

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_n は、

$$c_n = \eta_d \left\{ \sum_{i=0}^{j-1} p_l(i) - p_l(j) + \frac{p_l(j)}{\eta_i} \right\} T + (1-\eta_d)(n-1)T \quad (5.10)$$

となる。

したがって、 $c_n - c_n$ を計算すると、

$$c_n - c_n = \left\{ (1-\eta_d) - \frac{\eta_d(1-\eta_i)p_l(j)}{\eta_i} \right\} T \quad (5.11)$$

であるから、

$$p_l(j) < \frac{(1-\eta_d)\eta_i}{(1-\eta_i)\eta_d} \quad (\equiv \eta_{th}) \quad (5.12)$$

のとき、 $c_n > c_n$ 、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_n 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(5.12)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(5.12)式の右辺(これを η_{th} とおく) 以上の場合、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) 太陽光発電電力予測を用いた運用方法

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残存電力量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5.16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5.16(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。

$$p_d(i) = \begin{cases} p_l(i) - p_p(i) & (p_l(i) - p_p(i) \geq \eta_{th}) \\ 0 & (p_l(i) - p_p(i) < \eta_{th}) \end{cases} \quad (5.13)$$

ただし、 η_{th} は、(5.12)式の右辺で定義される値である。

図5.16(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 $t = (i + 1)T$ での蓄電池残存電力量を予測し、これを $E_b(i + 1)$ とする。図5.16(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ので蓄電池残存電力量は変化がない。区間 $2T \leq t < 3T$ では、ディーゼル発電機が停止しているので蓄電池は放電し蓄電池残存電力量が減少している。

(Step 5)

$E_b(i+1)$ が定められた蓄電池残存電力量の下限設定値 $E_{b,min}$ 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5.16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、 $\{E_{b,min} - E_b(3)\} / \eta_p$ 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、 $p_i(j) - p_p(j)$ を最大とする j を j_{max} としたとき、 $p_d(j_{max}) = 1$ とする。図5.16 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決定していた区間 $2T \leq t < 4T$ のうち、 $p_i(2) - p_p(2) > p_i(3) - p_p(3)$ 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量 $p_d(2)$ を1 とする(同図(f))。

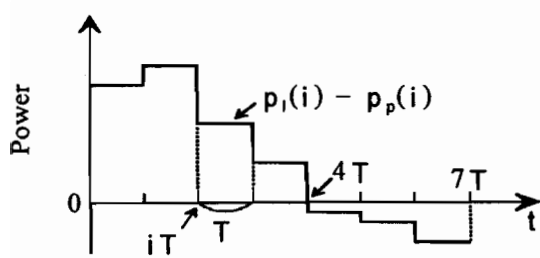
(Step 7)

$E_b(i+1)$ が、蓄電池容量 $E_{b,max}$ を超える場合は、蓄電池残存電力量 $E_b(j)$ 、($j = 1, 2, \dots, i+1$) 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量 $p_d(j)$ 、($j = 0, 1, \dots, i$) を $E_b(i+1) \leq E_{b,max}$ となるよう減少させる。

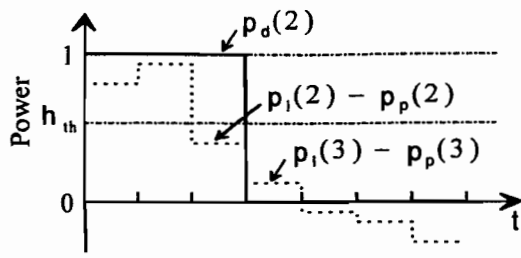
図5.16の例では、太陽光発電電力が負荷電力を上回り蓄電池を充電するため $E_b(7)$ が $E_{b,max}$ を超えている(同図(g))。したがって、 $p_d(2)$ を低下させる(同図(h))ことにより、 $E_b(7) = E_{b,max}$ としている(同図(i))。

(Step 8)

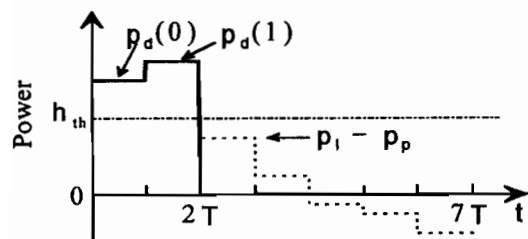
i の値を1 増加させ、Step 4 に戻る。これを、 $i = n - 1$ まで繰り返す。図5.16の例では、最終的に同図(h) がディーゼル発電機の発電計画となる。なお、これはディーゼル発電機の出力量決定手順を説明するための例であるのでここで留めているが、 $t > 7T$ でも太陽光発電電力が負荷電力を上回ると予測されるならば、さらに $p_d(2)$ を下げて蓄電池充電状態の下限を下回らない範囲で低く抑える必要がある。



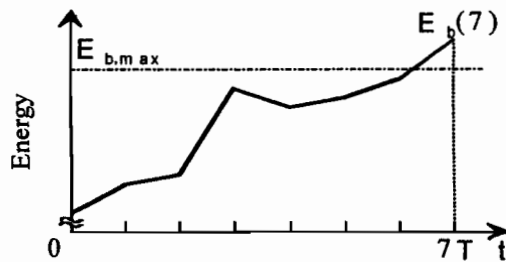
(a) Step 1



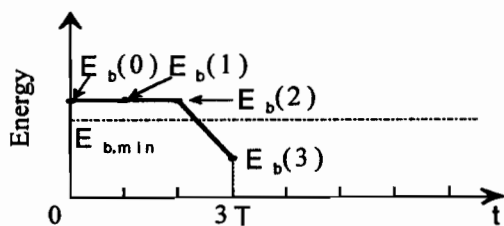
(f) Step 6 ($i = 3$)



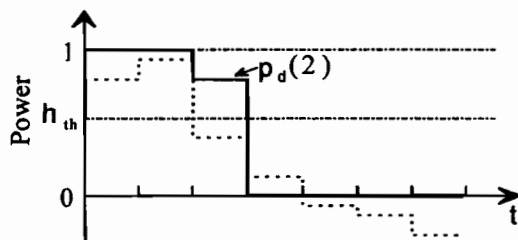
(b) Step 2



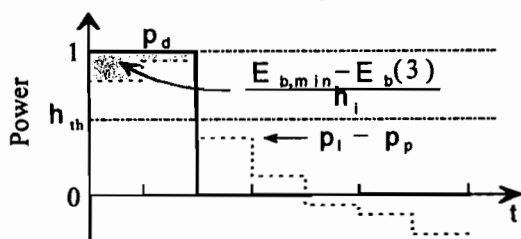
(g) Step 4 ($i = 6$)



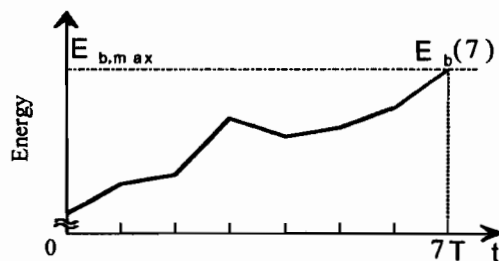
(c) Step 4 ($i = 2$)



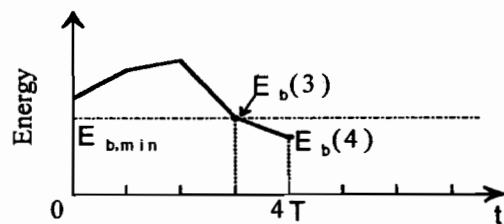
(h) Step 7 ($i = 6$)



(d) Step 5 ($i = 2$)



(i) Step 4 (final)



(e) Step 4 ($i = 3$)

図5.16 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

5.3.3 シミュレーションによる運用方法の検証

(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(5.3.2節で述べた 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。

(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(45)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、(4.1)式を変形した次式で近似できる⁽³⁷⁾。

$$H(t) = I_0 A^{\cosh h(t)} \cos \theta(t) + \frac{I_0 \sinh(t) \{1 - A^{\cosh h(t)}\}}{2(1 - 1.4 \ln A)} \frac{(1 + \cos \beta)}{2} \quad (5.14)$$

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、 ϕ を観測地点の緯度、 δ を赤緯として、

$$\sinh(t) = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega(t) \quad (5.15)$$

$$\cos \theta(t) = \sinh(t) \cos \beta + \cosh(t) \sin \beta \cos \{\alpha(t) - \alpha'\} \quad (5.16)$$

$$\cos \alpha(t) = \frac{\sinh(t) \sin \phi - \sin \delta}{\cosh(t) \cos \phi} \quad (5.17)$$

と表せる。ただし、 $\omega(t)$ 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、

$$E_p(i) = \int_{t(i)}^{t(i+1)} H(t) A_p \eta_p dt \quad (5.18)$$

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、

$$p_p(i) = E_p(i) \frac{E_{p,mes}}{E_p(-1) T P_{d,max}} \quad (5.19)$$

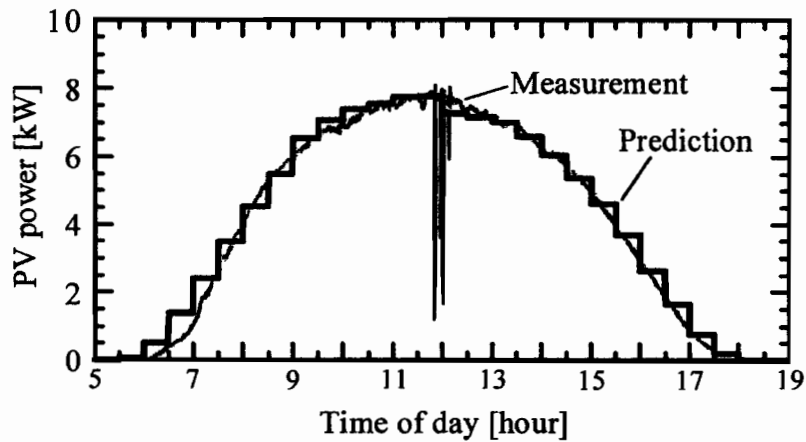
で与えられる。

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、及び翌日の予測値には $E_p(i) / T P_{d,max}$ (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、蓄電池残存電力量を低めに抑え、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。

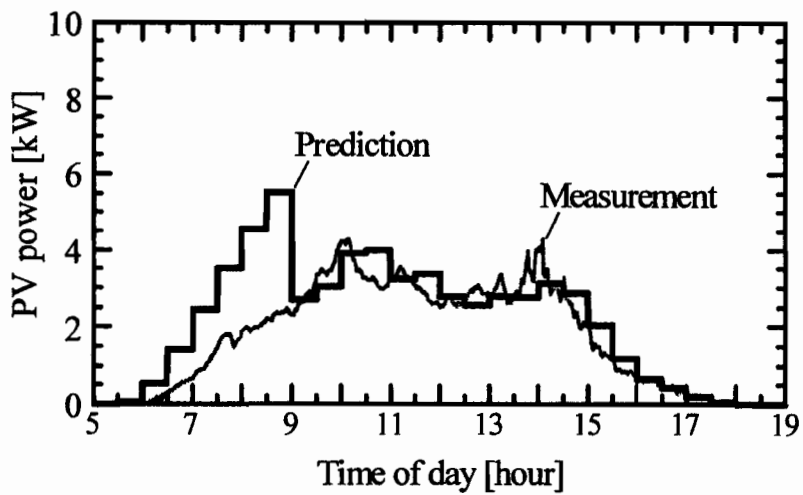
(3) 太陽光発電電力予測の精度

太陽光発電電力予測の実例を図5.17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。



(a) Bright sky(Apr. 1st, 2000)



(b) Cloudy(Apr. 2nd, 2000)

図 5.17 太陽光発電電力予測の例

(4)シミュレーション結果

①ディーゼル発電機出力電力の例

図5.18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、5.3.2節で述べた低充電電力量方式(Method 1), 及びディーゼル発電機定格出力方式(Method2)の結果も併せて示している。同図(a)がMethod1, 同図(b) がMethod2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5.4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。

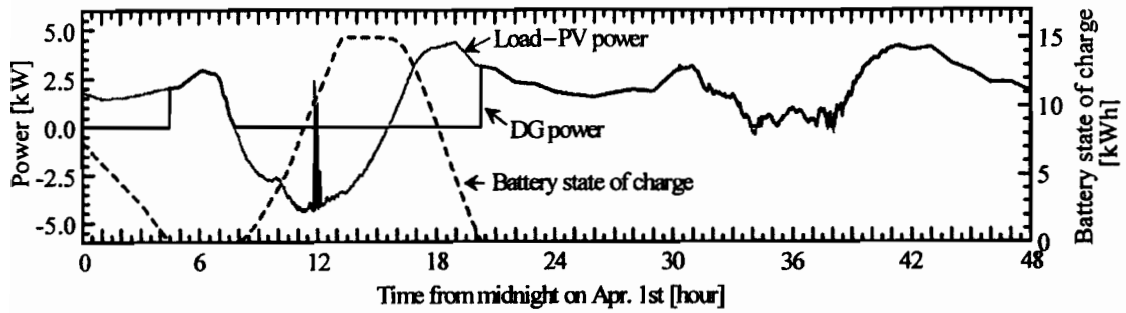
シミュレーション条件として, $\eta_f = 0.72$, $\eta_b = 0.90$, $\eta_i = 0.80$ と仮定した。蓄電池容量は15kWh とし, 充電状態の下限を0.3kWh としている。このシミュレーション条件の場合, (5.12) 式の η_{th} の値は約1.6 となり, $p_l(j) - p_p(j) < \eta_{th}$ が常に成り立つ。したがって, 不足電力が多いときにディーゼル発電機を定格出力で運転し, 不足電力が少ないときには停止する運用方法が最も燃料消費量を抑えることができる。

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5.18(a) のMethod1では, 蓄電池の充放電電力量を最小にするため, 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5.4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

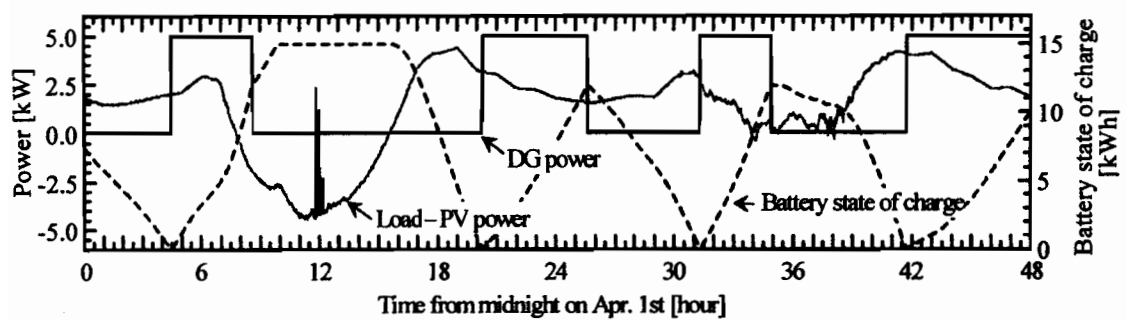
べて最も少ないが、ディーゼル発電機の平均負荷率が0.41 と低いとため、燃料消費量は20.62 と最も多くなっている。

次に、図5.18(b) のMethod2 では、蓄電池残存電力量が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、蓄電池残存電力量が容量の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。

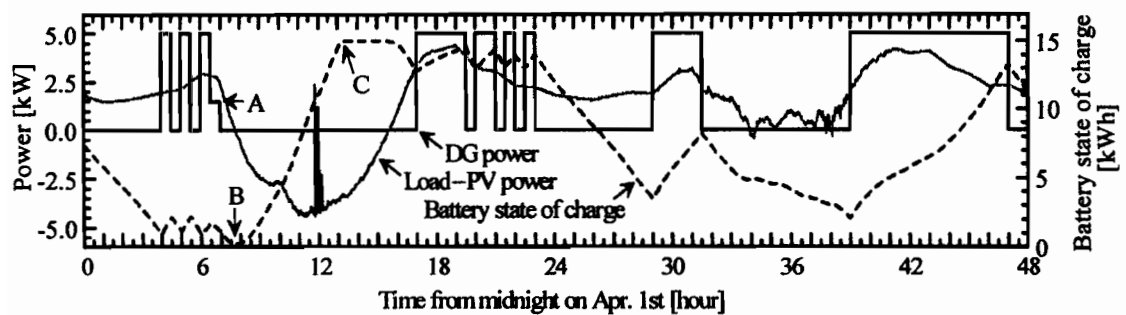
さて、図5.18(c) の提案する予測を用いた運用方法で予測が完全で誤差を含まない場合では、4～7 時の時間帯は、その日の太陽発電電力量が十分であることから、蓄電池残存電力量を低めに抑えるためにディーゼル発電機の起動と停止を繰り返す、必要最小限の発電を行っている。特に、6時30分～7 時は、出力を定格値より下げており(図中の矢印A)、その結果、図中矢印Bで示すように蓄電池残存電力量が下限まで下がっている。これにより、蓄電池が満充電状態(図中矢印Cで示す時刻以降)にあるため充電できない太陽光発電電力量を4.44kWhとMethod1と同程度に小さくすることができている。17時～23時の時間帯では、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、Method2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。



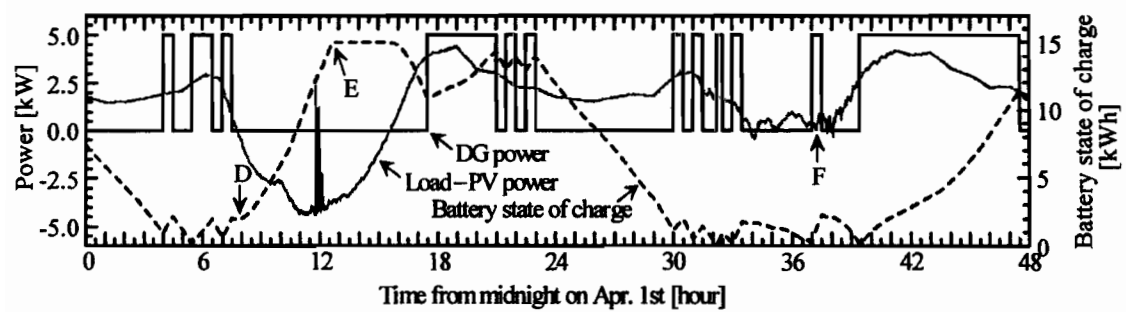
(a) Method 1



(b) Method 2



(c) Ideal prediction.



(d) Real prediction.

図5.18 シミュレーション結果の例

表5.4 図5.18の例における燃料消費量など

	ディーゼル 発電機発電 電力量[kWh]	蓄電池充 電電力量 [kWh]	廃棄電力量 [kWh]	平均負荷率	燃料消費量
Method1	73.44	29.91	4.22	0.41	20.62
Method2	94.05	73.13	15.40	1.00	18.81
Ideal prediction	79.07	48.24	4.44	0.98	15.91
Real prediction	81.37	52.22	6.15	1.00	16.27

最後に、図5.18(d) に示す誤差を含む実際の予測方法を用い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、蓄電池残存電力量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6.15kWh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。

②燃料消費量の比較

図5.19に年間燃料消費量のシミュレーション結果を示す。横軸は蓄電池容量で5kWh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Method1, Method2の結果も示す。なお、Method1の蓄電池容量0kWh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。

Method1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。Method2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15～30kWh時)～1.4%(蓄電池容量5kWh時)しか増えておらず、本提案方式は有効といえる。

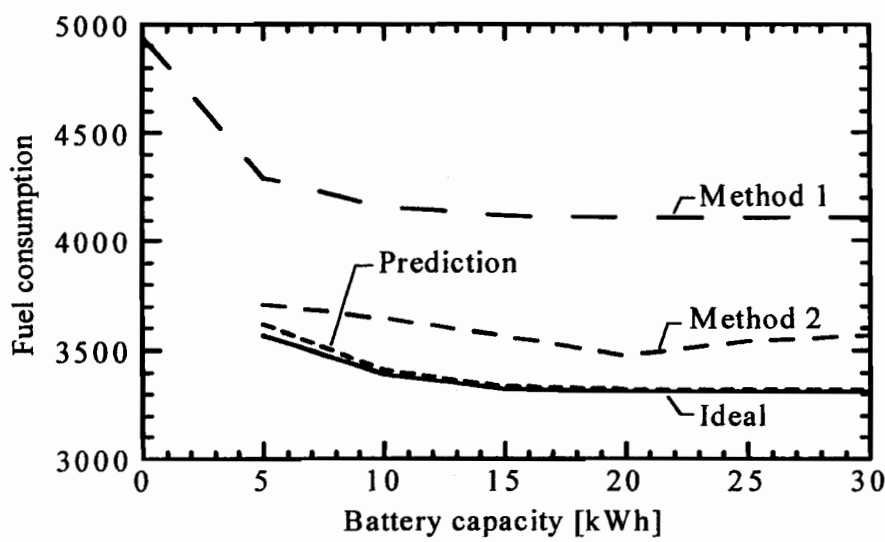


図5.19 各運用運用方法による年間燃料消費量(蓄電池容量を変化させた場合、太陽光発電設備容量 10kW, $\eta_d=0.72$, $\eta_b=0.90$, $\eta_i=0.80$)

図5.20は、太陽光発電装置の設備容量を5kW～25kW まで5kWずつ変化させて計算を行った結果である。なお、25kW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50kWh 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5kW, 10kW 時)～1.3%(太陽光発電25kW 時)の燃料消費量の増加で収まっている。

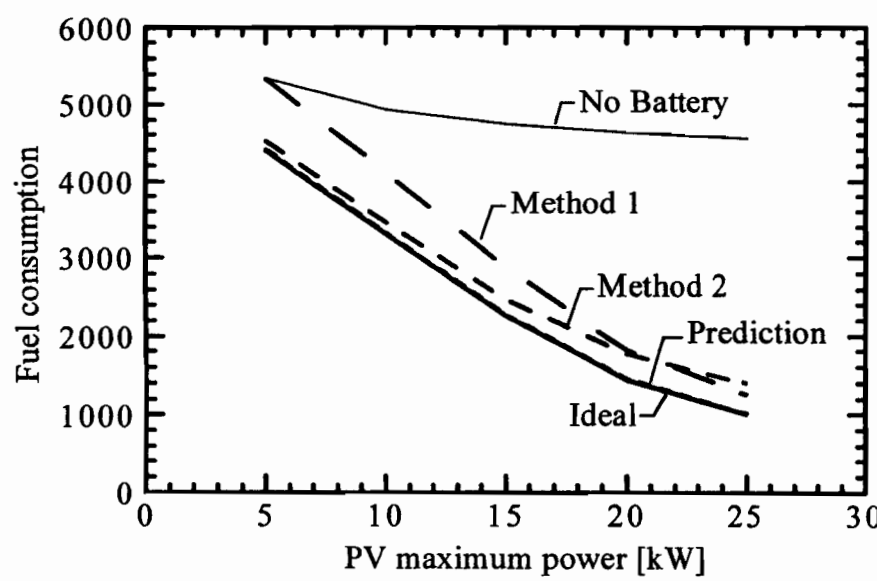


図5.20 各運用運用方法による年間燃料消費量(太陽光発電設備容量を変化させた場合, 蓄電池容量 50kW, $\eta_d=0.72$, $\eta_b=0.90$, $\eta_i=0.80$)

次に、充電効率が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5.21に示す。太陽光発電の設備容量は10kW である。この場合、(5.12) 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 まで落として運転する場合も出てくる。図5.19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30kWh 時)～1.7%(蓄電池5kWh 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。

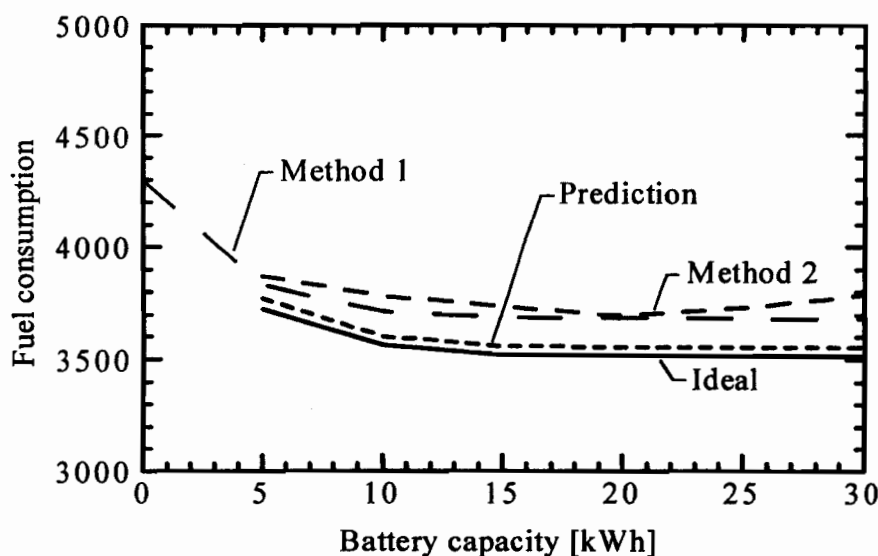


図5.21 各運用運用方法による年間燃料消費量(蓄電池容量を変化させた場合, 太陽光発電設備容量 10kWh, $\eta_d=0.85$, $\eta_b=0.80$, $\eta_i=0.70$)

最後に、図5.14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5.22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3kW一定で1年間全く変動しない場合、横軸2.0kW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5.19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Method 1, Method2 に比べて燃料消費量を減らせることに違いはない。

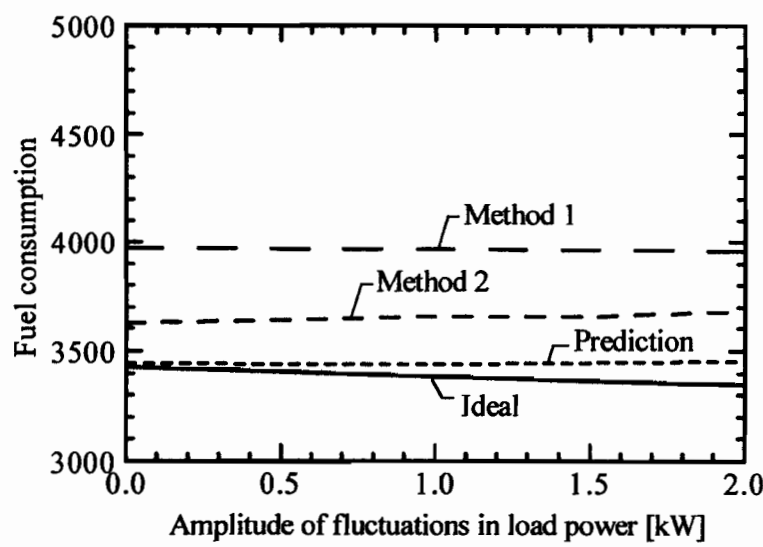


図5.22 各運用運用方法による年間燃料消費量(負荷のタイプを変化させた場合, 太陽光発電設備容量 10kW, 蓄電池容量 15kWh, $\eta_d=0.72$, $\eta_b=0.90$, $\eta_i=0.80$)

5.4 まとめ

本章では、風力発電、太陽光発電とディーゼル発電を統合したハイブリッドシステムととらえ、需要側である船内電力の負荷変動特性、及び逆に供給側である風力及び太陽光発電の電力変動特性に着目し、単純連系方式よりも省エネルギー効果が高いと期待される、

- ・風力・太陽光発電電力をピークロード用として利用する運用方法
 - ・太陽光発電電力の予測を用いたハイブリッドシステムの運用方法
- を提案し考察を行った。

まず、消費電力に比べ小出力の風力・太陽光発電電力を低負荷時、蓄電池に供給し、高負荷時、ピークカットを行う運用方法について考察し、練習船“海技丸”を対象として、風力・太陽光発電システムを導入した船舶電源システムの導入を検討し、風力・太陽光発電電力を単純連系方式にて負荷に供給する運用方法と、提案した運用方法を用いてシミュレーションを行った。

提案した運用方法を用いると消費電力のピークカットによって、発電用ディーゼル機関の定格出力が 29%減少し、平均負荷率の増加によって、燃料消費量を削減できる結果になった。船舶電源に風力発電や太陽光発電の導入を検討した場合、設置スペース等の問題から小出力になるが、提案した運用方法によって、省エネルギー効果を高めることができると考える。

次に、太陽光発電とディーゼル発電を統合したハイブリッドシステムにおいて、太陽光発電の電力変動特性に着目し、太陽光発電の発電電力の予測を用いたハイブリッドシステムの運用方法を提案し、神戸商船大学の太陽光発電実験装置によって計測を行った発電電力データを用いてシミュレーションを行い、予測を用いない

運用方法(低充電電力量方式, ディーゼル発電機定格出力方式)とディーゼル発電機の燃料消費量の比較を行った。シミュレーション条件として, 蓄電池容量, 太陽光発電電力容量及び充電効率を変化させ, また, 負荷変動も考慮した。いずれの場合も, 提案する運用方法は, 太陽光発電電力を有効に利用し, 蓄電池充放電電力量を減らし, ディーゼル発電機を最適な負荷率で運転することによって, 他の運用方法に比べ燃料消費量を削減できることが確認された。

第 6 章 結論

風力発電及び太陽光発電の船舶電源への導入に向けて、導入方法及び導入したシステムの効果的運用方法を提案した。

具体的に、導入するために必要な課題として、風力発電装置を船舶に導入する方法や洋上を航行する外航船舶上の太陽電池アレイの発電電力推算法について考察を行い、導入の効果に関しては燃料消費量、 NO_x 、 SO_x 排出量で評価することとした。まず、船内電源と単純連系した場合について、大型船舶、小型船舶に対するケーススタディを行い、次に、ディーゼル発電と風力及び太陽光発電をハイブリッドシステムとみた効果的運用方法の提案、及びそれら提案方法に対するシミュレーションとケーススタディを行った。得られた結果をまとめると以下になる。

1. 実際に航行している船舶に風力発電システムの導入を検討する際の手順について、データや図面が入手できれば、船舶の種類や大きさ、航路を問わず、すべての船舶に適用できる方法を提案した。
2. 外航船舶に太陽電池を設置した場合、グローバルに移動するため、発電量は予測し難い。そこで、船舶のログブックに記録されている正午位置、及び天候から日射量を推算し、太陽光発電電力量を推定する簡便な方法を提案した。

気象の影響については、実際の日射量と理論日射量との比で定義する天候係数を導入し、この天候係数と雲量との相関を求めることによって、気象影響の考慮が可能になることを示した。

提案した方法によって、航路別の日積算日射量を求めると、北米航路では平均 2.5kWh/m^2 、豪州航路では平均 4.2kWh/m^2 、欧州航路では平均 4.5kWh/m^2 であり、航路によってかなり異なること、また季節別にも異なることが分かった。この日射量から期待できる発電電力量を推算すると、甲板上に水平に置いた太陽電池アレイ 1m^2 、1 日あたり、北米、豪州及び欧州でそれぞれ、 0.30kWh 、 0.50kWh 、 0.53kWh となった。

3. 提案した手法を適用し実際に航行している船舶の電源システムに適用し単純連系方式で風力発電、太陽光発電を導入した場合、燃料消費量つまり CO_2 、 NO_x 、 SO_x 排出をどの程度削減できるか、導入効果を調べるためにケーススタディを行った。大型船舶の例として外航石炭専用船を、小型船舶の例として“深江丸”を対象にケーススタディを行った。

外航石炭専用船の場合、甲板上に定格出力 12.4kW の風力発電機が 12 基、及び 1905m^2 の太陽電池アレイの設置が可能であり、両者で使用電力量の平均 23.4% 供給できる結果になった。深江丸の場合、風力発電機のためのケーススタディであるが、甲板上に定格出力 10.3kW の風力発電機を 1 基設置が可能であり、使用電力量の平均 3.9% 供給できる結果になった。いずれの場合も、風力発電、太陽光発電の導入によって燃料消費量及び、 NO_x 、 SO_x 排出量削減効果が得られるという結果を得た。しかし、単純連系方式では風力発電及び太陽光発電電力量に相当する分が削減できるだけで、対象船舶全体の燃料消費量及び、 NO_x 、 SO_x 排出量に対する比率は大きなものでないことが分かった。

4. 船内ディーゼル発電と風力及び太陽光発電をハイブリッドシステムと考え、単純連系方式よりも一層効果的な運用方法について考察し、その1つとして船内電力負荷の変動特性に着目したピークカット方式を提案した。これは、風力及び太陽光発電電力を蓄電池に充電し、電力負荷ピーク用に利用する運用方法である。シミュレーションと練習船“海技丸”を対象としてケーススタディを行った結果、提案した運用方法を用いると消費電力のピークカットによって、発電用ディーゼル機関の定格出力が29%減少し、平均負荷率の増加によって、単純連系方式に比べ、燃料消費量を削減できるという結果を得た。

5. 2つ目の効果的な運用方法として、太陽光発電の発電電力変動に着目し、太陽光発電電力を予測し、その予測に応じてディーゼル発電機の最適な出力電力を決定する運用方法を提案した。神戸商船大学の太陽光発電実験装置の発電電力データを用いてシミュレーションを行った結果、提案した運用方法は、太陽光発電電力を有効に利用し、蓄電池充放電電力量を減らし、ディーゼル発電機を最適な負荷率で運転することによって、他の運用方法に比べ燃料消費量を削減できることを確認した。

以上、風力発電及び太陽光発電の船舶電源への導入に向けて、それらの検討方法や、運用方法に関する研究を行った。これらの研究成果は、風力発電及び太陽光発電の船舶電源への導入のための基礎的資料になり、海上を航行する船舶に関するエネルギーや環境問題に貢献するものと期待される。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、終始適切な御指導、御鞭撻を戴きました、神戸商船大学、橋本 武名誉教授、西川榮一教授、杉田英昭教授、小豆澤照男教授、山本茂広助教授、海技大学校、引間俊雄教授、城戸八郎教授、ならびに終始適切な御助言を戴きました、神戸商船大学、坂本 研也教授、中井 昇教授、矢野吉治教授に心から深く感謝の意を表します。多方面にわたり、多大な御援助を戴きました電気工学研究室、電子制御研究室の大学院生、学生諸君にも厚く御礼申し上げます。

また、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、田嶋 稔氏、文挟克実氏に感謝の意を表します。

参考文献

- (1) NEWS REPORT, OHM2002・MAY, pp. 9-11, オーム社 (2002)
- (2) 牛山 泉: 2020 年までに世界の電力の 12%を賄うと期待される風力発電技術, OHM2003・JULY, pp. 2-3, オーム社 (2003)
- (3) 牛山 泉: 市街地への小型風力発電設備の導入とその課題, 風力エネルギー, Vol. 27, No. 1, pp. 21-24, 日本風力エネルギー協会 (2003)
- (4) 経済産業省 資源エネルギー庁: 今後のエネルギー政策, OHM2001・DECEMBER, pp. 29-32, オーム社 (2001)
- (5) 日本財団: 平成 13 年度船舶排ガス環境への影響と排出抑制に関する総合的調査報告書 (2002)
- (6) 平田 賢: 船舶起源の大気汚染防止と船用機関の将来, 日本マリンエンジニアリング学会誌, Vol. 37, No. 1, pp. 5-19 (2002)
- (7) 日本財団: 平成 13 年度 21 世紀における我が国の海洋ビジョンに関する研究報告書 (2002)
- (8) 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)
- (9) 西田修身, 細田 茂, 足立 和伯, 藤田浩嗣, 原野 亘, 河路 建, 北村 彬夫, 阪口 宏介: 実船用海水電解法による NO_x , SO_x の低減効果, 第 70 回マリンエンジニアリング学術講演会講演論文集, pp. 33-34 (2003)
- (10) 瀧澤宗人: ふねの話, 技術堂出版 (1994)
- (11) 牛山 泉: オフショア風力発電, 風力エネルギー, Vol. 27, No. 2, pp. 41-44, 日本風力エネルギー協会 (2003)

- (12) 松宮 輝: ここまできた風力発電, 工業調査会, pp. 41-45 (1998)
- (13) 澤 隆雄, 網谷泰孝, 越智 寛, 志村拓也: トリトンブイにおける太陽電池利用の可能性について, 海洋科学技術センター試験研究報告, 第 39 号, pp. 47-52 (1999)
- (14) 渡辺百樹, 丸山敏雄, 辻 高輝: 洋上用太陽光発電システムの開発, 電気学会半導体電力変換研究会資料, SPC-86-74, pp. 41-47 (1986)
- (15) 大内 一之, 山磨 敏夫: 密度流拡散装置への太陽光発電システムの導入, 第 62 回マリンエンジニアリング学術講演会講演論文集, pp. 100-103 (1999)
- (16) 神戸商船大学ソーラーエネルギー研究会, ソーラーボート“光耀”奮闘記, 日本舶用機関学会誌, Vol. 28, No. 8, pp. 520-526 (1993)
- (17) 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, pp. 9-13 (1996)
- (18) C. Schaffrin: The Solar Boat “KOLONA”-Two Years Experience, 10th, European Photovoltaic Solar Energy Conference, pp.813-815 (1991)
- (19) 菊地 潤, 松前太郎, 片木 威, 橋本 武: ソーラーボート電気系の特性解析(2), 神戸商船大学紀要, No. 41, pp. 69-78 (2002)
- (20) 三原伊文, 横畠昭典, 藤谷 親, 大石興基: 内海における高齢者のためのソーラー遊漁船の開発, 日本マリンエンジニアリング学会誌, Vol. 38, No. 2, pp. 16-21 (2003)
- (21) 日本舶用機関学会電気電子システム研究委員会編, 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 (1996)
- (22) 藤井 嘉己, 片木 威, 橋本 武: 太陽光発電の船内電力への応用に関する

- る検討, 日本船用機関学会誌, Vol. 30, No. 12, pp. 863-868 (1995)
- (23) 山崎悦男:自動車運搬船“NEW CENTURY1”の概要, 日本造船学会誌, 868, pp. 54-57 (2002)
- (24) 大谷謙二:インターネットを通して見られる世界の日射関連データ, 太陽エネルギー, Vol. 25, No. 5, pp. 26-32 (1999)
- (25) 新太陽エネルギー利用ハンドブック編集委員会編:新太陽エネルギー利用ハンドブック, pp. 30-37 (2000)
- (26) 長井 浩:太陽光発電と風力発電等のハイブリッドシステム, 太陽エネルギー, Vol. 26, No. 5, pp. 2-39 (2000)
- (27) 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)
- (28) 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, 電気学会論文集B, 118, 11, pp.1284-1291 (1998)
- (29) 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)
- (30) M. Muselli, G. Notton and A. Louche: Design of hybridphotovoltaic power generator with optimization of energy management, Solar Energy, Vol.65, No.3, pp.143-157 (1999)
- (31) Y. Ismail, Y. Kemmoku, H. Takikawa and T. Sakakibara: An operating method for fuel savings in a stand-alonewind/diesel/battery system, J. JSES, Vol.28,

No.2, pp.31-38 (2002)

- (32)清水幸丸： 風力発電技術，パワー社，pp. 61-63 (1994)
- (33)牛山 泉，三野 正洋： 小型風車ハンドブック，パワー社，pp. 46-52 (1994)
- (34)高城 清： 実用船舶工学，海文堂，pp. 149-215 (1980)
- (35)角 和芳，引間俊雄，橋本 武，山本 茂広：風力発電システムの大型石炭専用船への応用に関する研究，第 64 回マリンエンジニアリング学術講演会講演論文集，pp. 93-96 (2000)
- (36)船舶ばい煙問題研究会：船舶からのばい煙量算定手法調査報告書 (1985)
- (37)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，pp. 10-20 (1985)
- (38)福地 章：海洋気象講座，オーム社，p. 167 (1975)
- (39)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，pp. 206 (2000)
- (40)日本船用機関学会：船舶電気・電子工学便覧，海文堂，pp. 50-61 (1981)
- (41)関西造船協会：商船機関部計画，海文堂，p.20 (1985)
- (42)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，電気学会論文集B，114，11，pp.1109-1115 (1994)
- (43)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)
- (44)J. B. Copetti and F. Chenlo: Lead/acid batteries for photovoltaic applications. Test results and modelling, J. Power Sources, Vol.47, 109-118 (1994)

- (45) 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, 電気学会論文集B, 121, 12, pp.1708-1715 (2001)

本研究に関する発表

論文

- (1)Kazuyoshi Sumi, Toshio Hikima, Takeshi Hashimoto, Shigehiro Yamamoto:
Basic Design of Electric Power Generating System with Wind Energy
Generating System for a Large Ship, Proceeding of World Renewable Energy
Congress VII Part II, pp.1233-1236 (2000)
- (2)Kazuyoshi Sumi, Toshio Hikima, Takeshi Hashimoto, Shigehiro Yamamoto:
Basic Research on the Application of Wind Energy Generation System to
Ships, Proceeding of the 6th International Symposium on Marine Engineering
Tokyo, pp.255-258 (2000)
- (3)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, 第 36 巻, 第 3
号, pp.22-29 (2001)
- (4)Kazuyoshi Sumi, Toshio Hikima, Takeshi Hashimoto, Shigehiro Yamamoto:
Study on the Application of Wind Energy Generation System to a small Ship,
Proceedings of ASME FEDSM'01, ASME 2001 Fluid Engineering Division
Summer Meeting, FEDSM2001-18150 (2001)
- (5)山本茂広, 角 和芳, 西川榮一, 橋本 武: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システム運用法, 電気学会論文誌 2004 年 4 月
号掲載予定 (2004)

(6)角 和芳, 西川榮一, 山本茂広, 橋本 武:外航船舶に設置した太陽電池の
発電電力量の推算, 日本太陽エネルギー学会誌掲載予定, Vol.30, No.2,
通巻 160 (2004)

口頭発表など

- (1)角 和芳, 引間 俊雄, 西川 栄一, 山本 茂広:海上の日射量推算方法に関する研究, 日本マリンエンジニアリング学会第 67 回マリンエンジニアリング学術講演会論文集, pp.45-48 (2002)
- (2)角 和芳, 引間俊雄, 西川栄一, 山本茂広, 橋本 武:風力・太陽光発電システムの船舶電源への導入に関する研究, 日本マリンエンジニアリング学会第 69 回マリンエンジニアリング学術講演会論文集, pp.112-115 (2003)