

風力・太陽光発電システムの 船内電源利用に関する研究開発

日本海事協会共同研究支援事業

平成25年2月

今治造船株式会社
株式会社 前川製作所



【研究開発体制】

本研究開発は、日本海事協会、今治造船株式会社、株式会社前川製作所との共同研究体制により研究を行うとともに、日本海事協会の「業界要望による共同研究」のスキームにより同協会の研究支援を受けて実施しております。

1. 研究目的
2. 調査内容及び実施体制
3. 研究用機材
4. 測定データの種類
5. システム構成概略
6. 出力予想
7. 測定データ解析結果報告
8. 考察
9. まとめ

1. 研究目的

船舶で使用される電気エネルギーのすべては船内の補機によって賄われている。補機の選定は最大負荷にあわせる事となるが、運行状態により、船内電力の負荷変動が大きい為、低負荷時との差が大きくなるとシステムとして効率的とはいえない。

これを解消するためには、消費電力の平準化、電源の分散化が考えられるが、船舶運行の性質上、消費電力の平準化は困難であり、電源の分散化が今後有効な手段として期待される。

また、主に船舶ではディーゼル発電機関により発電しているが、昨今の環境に対する意識の高まりから、排出ガスを抑える事が求められ、電源の分散化を行いつつ、CO₂、NO_xを減少させる手段として、自然エネルギーの利用が期待される。

そこで本研究では、自然エネルギーの代表格である風力発電と太陽光発電の船内電源への効率的利用について、調査・検証する事を目的とした。

2. 調査内容及び実施体制

調査内容

- ・船舶に搭載するにあたり、航海中の条件に耐えるシステムの開発を行う。
- ・実際の船舶に、風車及び太陽光パネルを搭載し、航海中の実運転データを収集する。
- ・収集したデータより、搭載システムの検証及び、風車、太陽光パネルの船舶への利用について考察する。

実施体制

共同研究 : 日本海事協会
今治造船株式会社 ……主計画立案、データ収集、機器搭載
株式会社 前川製作所 ……船舶用風車開発、製作、運転調整

事務局 : 今治造船株式会社

3. 研究用機材

①風力発電装置(風車)

船舶用風車基本諸元

定格出力	21kW (風速19m/s時)
全高	7.6m
風車部分高さ	4.9m
支柱高さ	1.8m
風車回転径	4.5m
風車部分重量	650kg
風車以外重量	4,900kg
発電機仕様	IPM型発電機 MAX40kW 前川製作所製
増速器	無し
制動システム	ディスクブレーキ×2(自動&手動) ディスクブレーキ×1(手動)

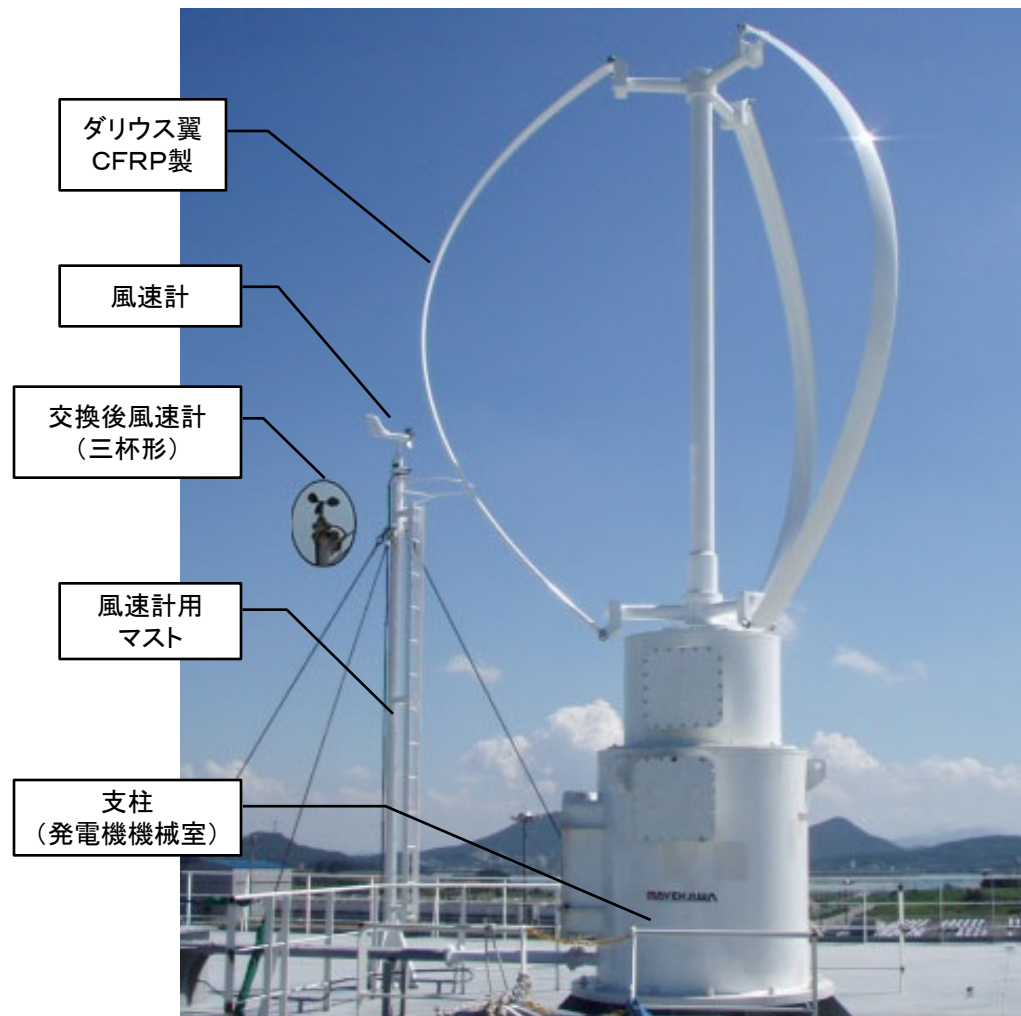


Fig.1 船舶用風車

ダリウス型風車について

本研究で船舶用風車として採用された「ダリウス型風車」は、垂直軸風車の一種であり、以下の様な特徴を持っている。

- a. 垂直軸風車で風向に対し無指向性であり、風向制御を必要としない。
- b. ダリウス翼の曲線形状は、遠心力に対し曲げ荷重を発生させず、構造的に強い形状である。
- c. ダリウス型風車の発電能力自体は、プロペラ型風車とほぼ同等。
- d. ダリウス型風車は自己起動性に乏しく、低風速では起動し難い。

この様に、長所・短所含め、特徴のある風車ではあるが、

- ・デッキ上の風向きは常に安定してはいない事
 - ・強風にも耐えられる構造
 - ・構造的にシンプルである事
 - ・起動の為にアシストを行う事により起動可能である事
- 等を考慮し、本風車形状の採用となった。

②風車用電力変換装置

電力変換装置として、太陽光パネル用パワーコンディショナシステム(PCS)をベースに試作開発、今回の研究用風車に使用している。

特徴

A. 風車の特性に合った出力制御を行う

B. 既定の回転数に達した場合に、回転数上昇を抑制させる制御を行う

以上2点を重視し、開発を行った。

特にBの制御を、独自に「ストール制御」と呼称している。

(B制御作動時は、風車翼面上で失速状態が多く発生していると考えられる為)

風車の特性として、発生する誘起電圧(風車の回転数 \div 風速に比例)に対し、出力はその3乗で増大する為、通常の太陽光パネル用PCSでは効率的に運転する事が出来ず、専用の機器が必要となる。

PCSによる風車運転(ストール制御)制御概略

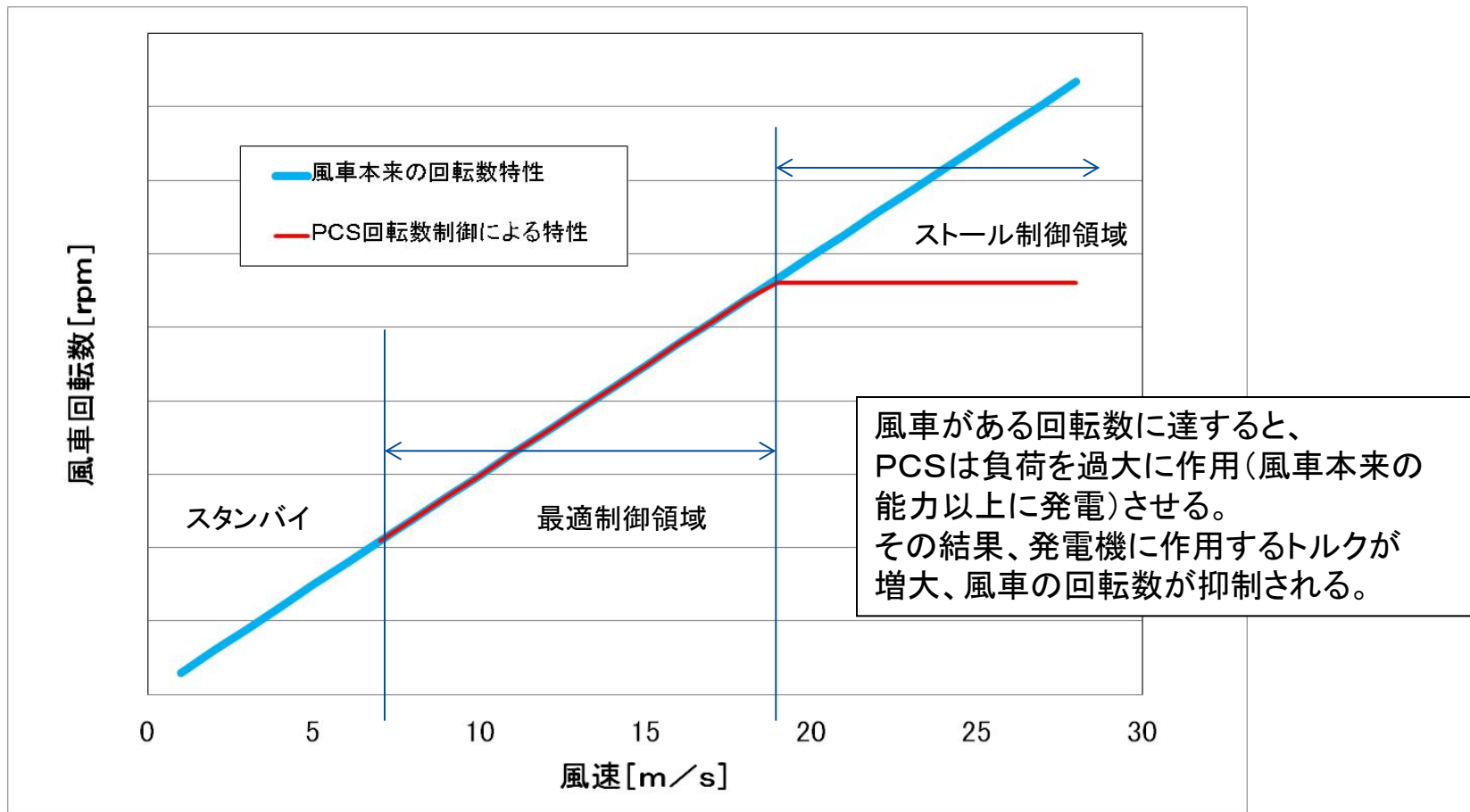
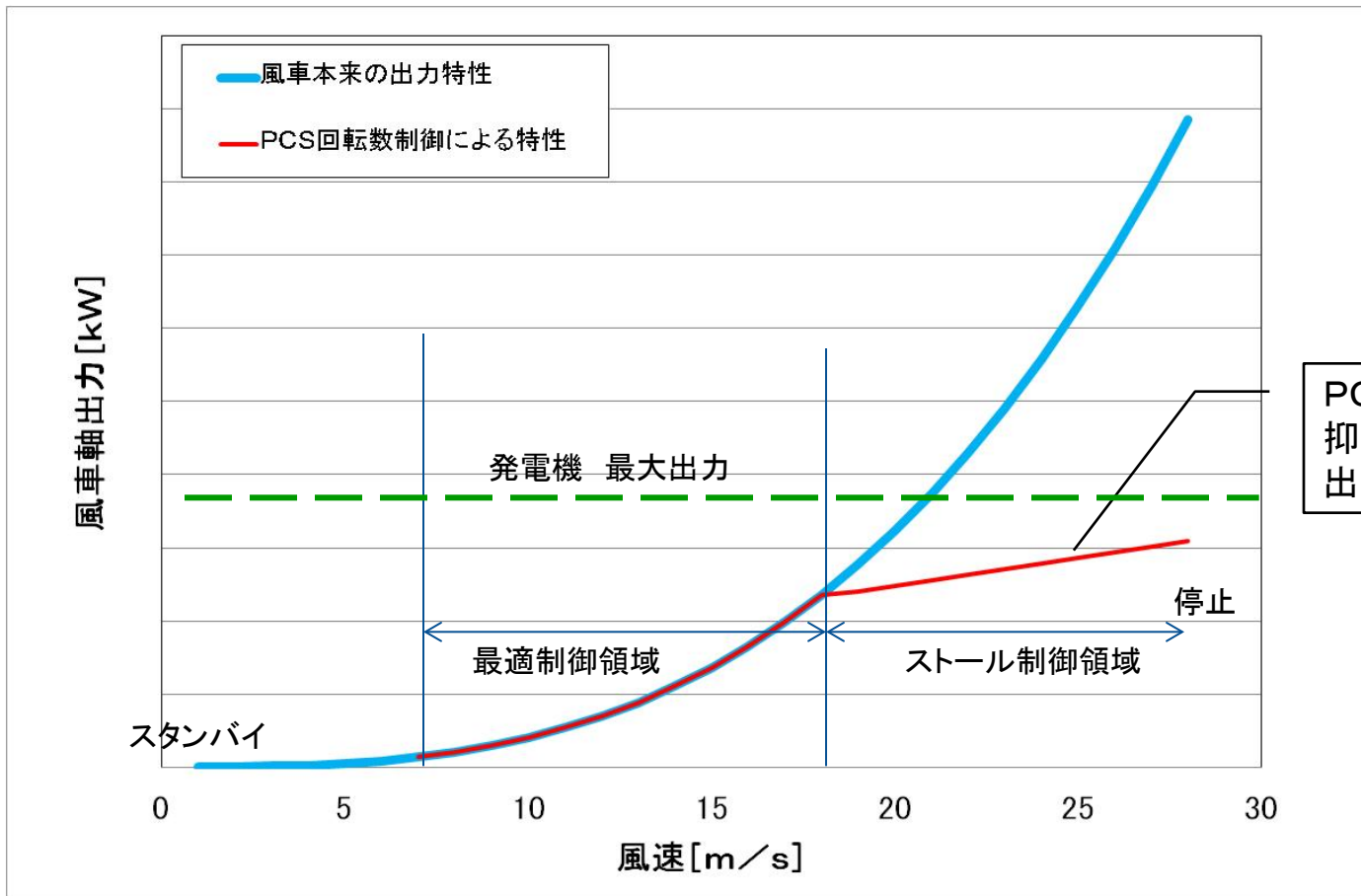


Fig.2 風速と風車回転数の関係



PCSによって回転数が抑えられた結果、出力が低下する。

Fig.3 風速と風車軸出力の関係

③太陽光パネル

太陽光パネル

最大出力 180W (25°C、日射量1000W/m²)

1枚当たり面積 1.36m²

28枚使用、計5,040W

設置面積 約7m×5.3m

太陽光用PCS

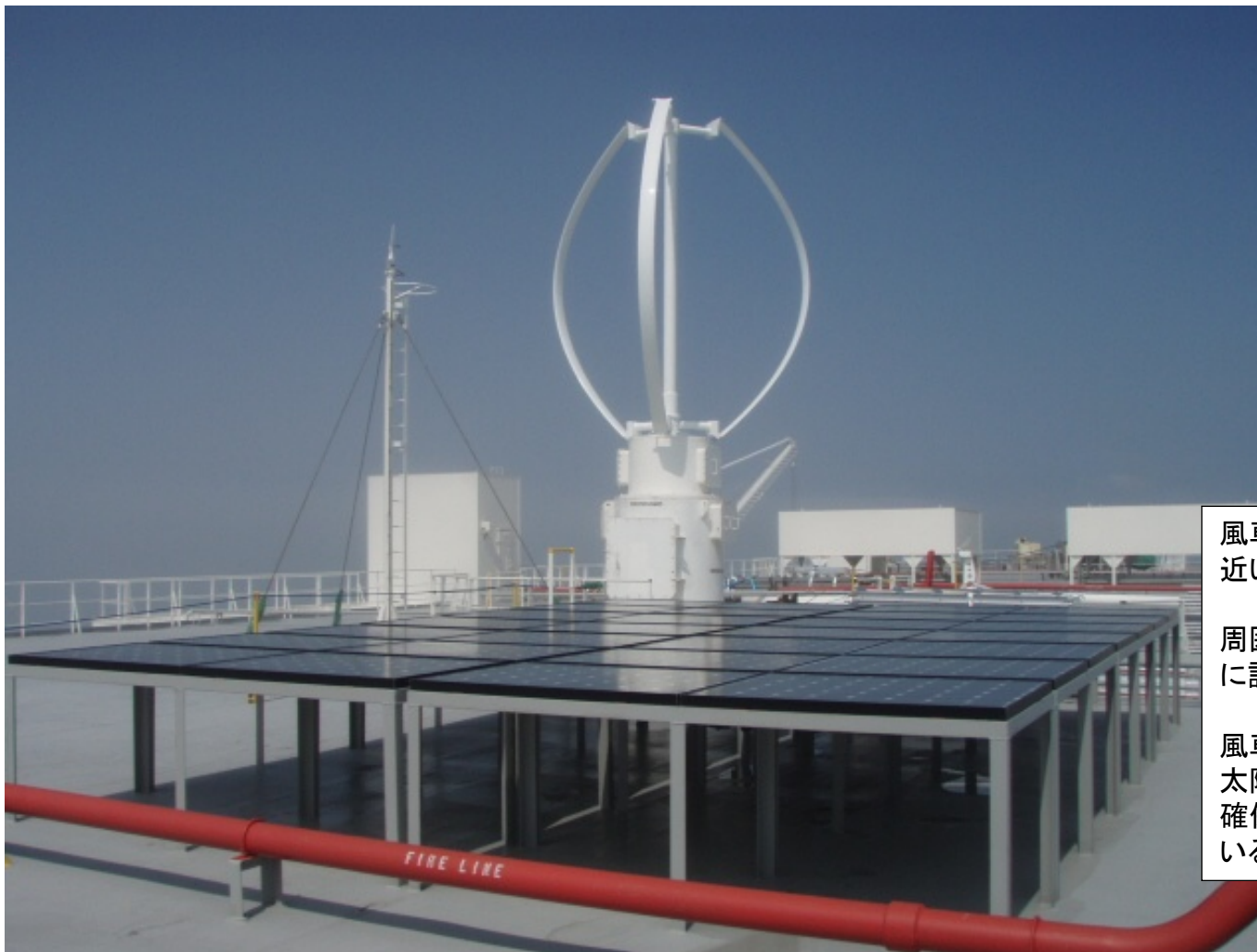
株式会社 明電舎製 太陽光発電用パワーコンディショナ

SUNGENEC シリーズ 10kW×1

定格出力 10kW

船内電源システムの電圧が440Vであった為、この電圧に適合する物として、上記のPCSを選定した。

太陽光パネル外観



風車と太陽光パネルは、
近い位置に設置されている。

周囲に極力構造物の無い位置
に設置している。

風車は船体幅方向の中心に、
太陽光パネルは甲板上の交通性
確保の為、左舷よりに設置されて
いる。

Fig.4 風車及び太陽光パネルの位置関係

機器配置見取り図

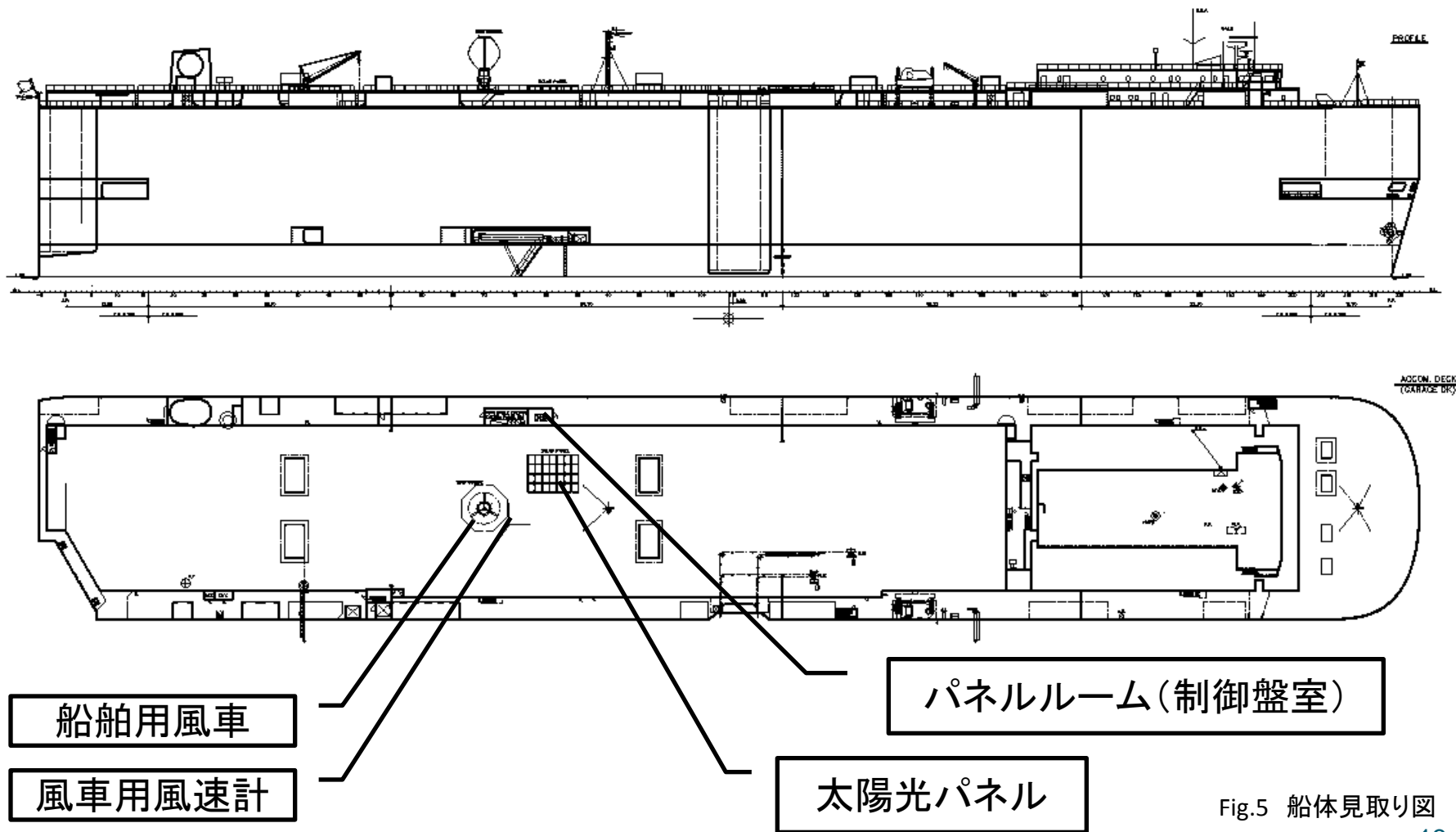


Fig.5 船体見取り図

4. 測定データの種類

収集データ種類

風車及び太陽光パネルの運転状態を検証する為、各種データを制御盤内データロガーにて計測した。以下に代表的なデータを示す。

データ名	単位	データ名	単位
風速	[m/s]	風車回転数	[rpm]
発電機出力電圧	[V]	発電機出力電流	[A]
PCS出力電力(風車)	[kW]	PCS出力電力(太陽光P)	[kW]
気温	[°C]	支柱内温度	[°C]
発電機巻線温度	[°C]	日射量	[kW/m ²]
太陽光P表面温度	[°C]	太陽光P裏面温度	[°C]

各データは、0.5秒の周期にて記録を行った。

2012年2月28日以降は、長期のデータ収集の為に、データ収集間隔を2秒に延長している。

また、上記の他、システムの非常停止、ブレーキ作動についても記録を行っている。

5. システム構成概略

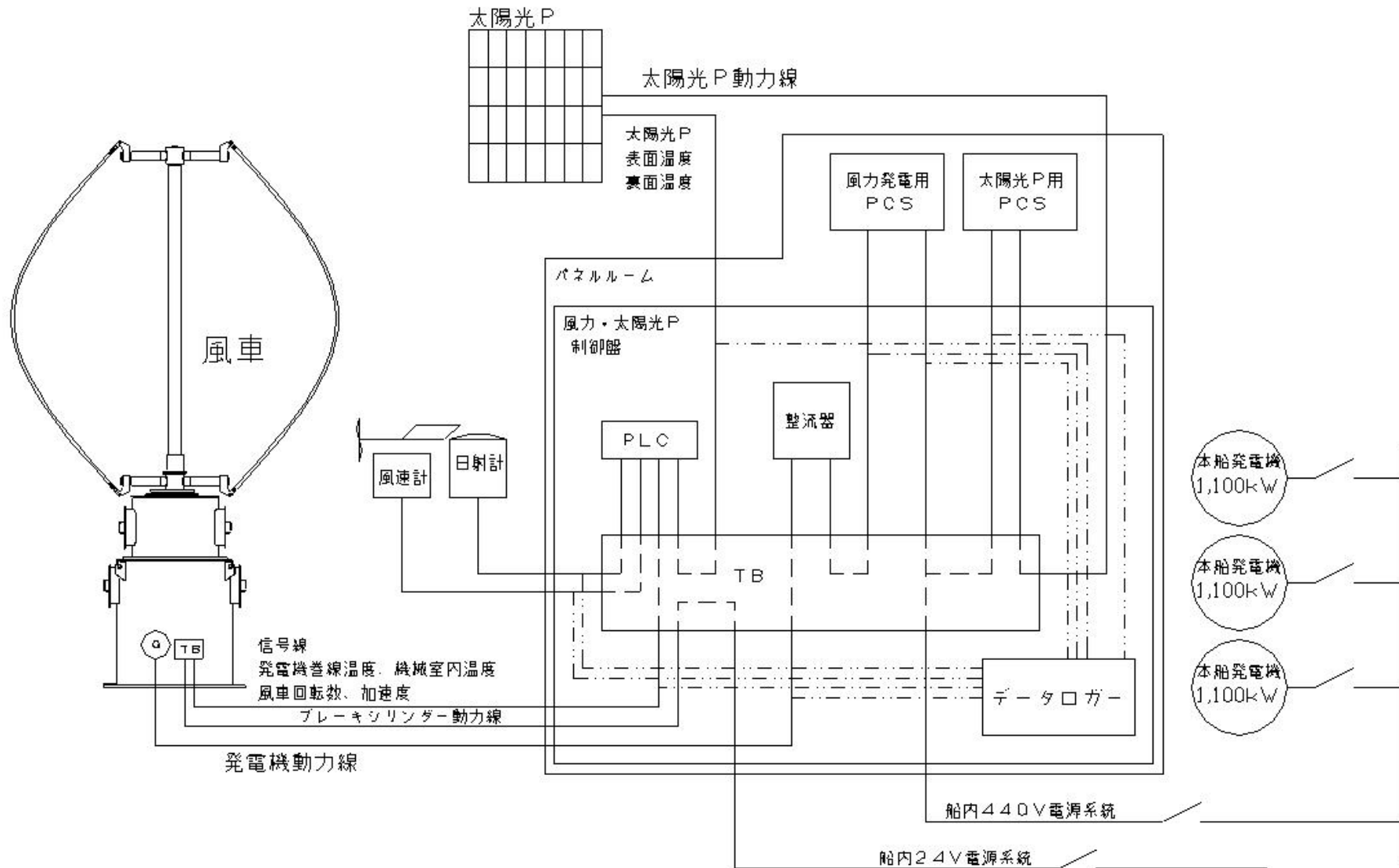


Fig.6 システム系統図

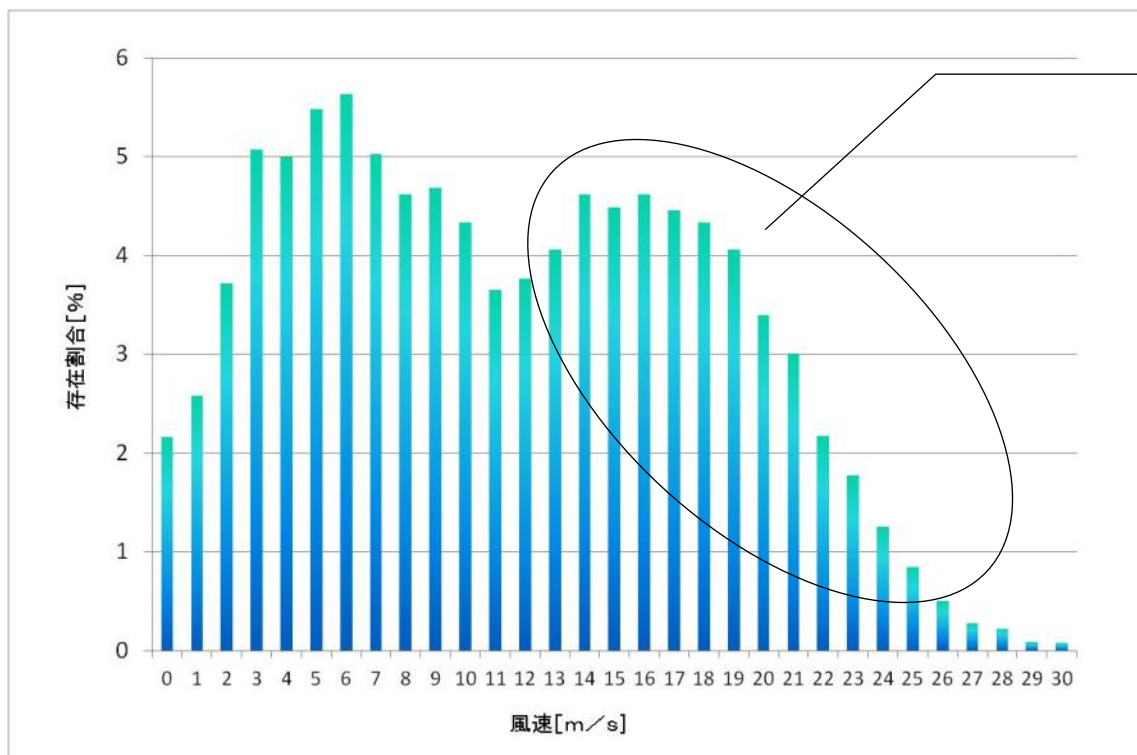
システム概略説明

- ・風車によって発電機が回転され、発電された電力(交流電流)は、制御盤内の整流器によって直流に変換される(PCSが直流入力仕様の為)。
- ・太陽光パネルからの電力は元々直流である為、そのままPCSに入力される。
- ・各PCSからの出力は、本船側の440V電源系統にシンクロし、系統連係(給電)される。(当発電装置での単独運転は不可)
- ・制御盤内には、発電機をモータとして回転させる為のインバータが備わり、風車起動時は船内電源によりアシスト運転を行う様にしている。
アシスト開始条件を設定し、無駄なアシスト電力を頻繁に使用しない様、起動後に発電が見込めない低風速の時、及び、起動後に高風速検知による自動停止が発生し得る、極端な強風時には風車が起動しない様にしている。
- ・強風対応の風車ではあるが、風速及び風車回転数を監視しており、想定以上の風速及び回転数となった場合に備え、ブレーキを作動し、回転を停止させる制御を行っている。

6. 出力予想

風車出力予想

本風車を計画、設計するにあたり、風車発電電力量の試算を行った。風車の発電電力量の試算には、当然ではあるが風速分布のサンプルが必要となる。今回は、今治造船提供の実際の航海データにおける風速分布サンプルを用い、発電電力量の試算を行った。なお、この風速サンプルは船上の相対風速で、自然風のみではなく、船体の移動速度も含まれている。



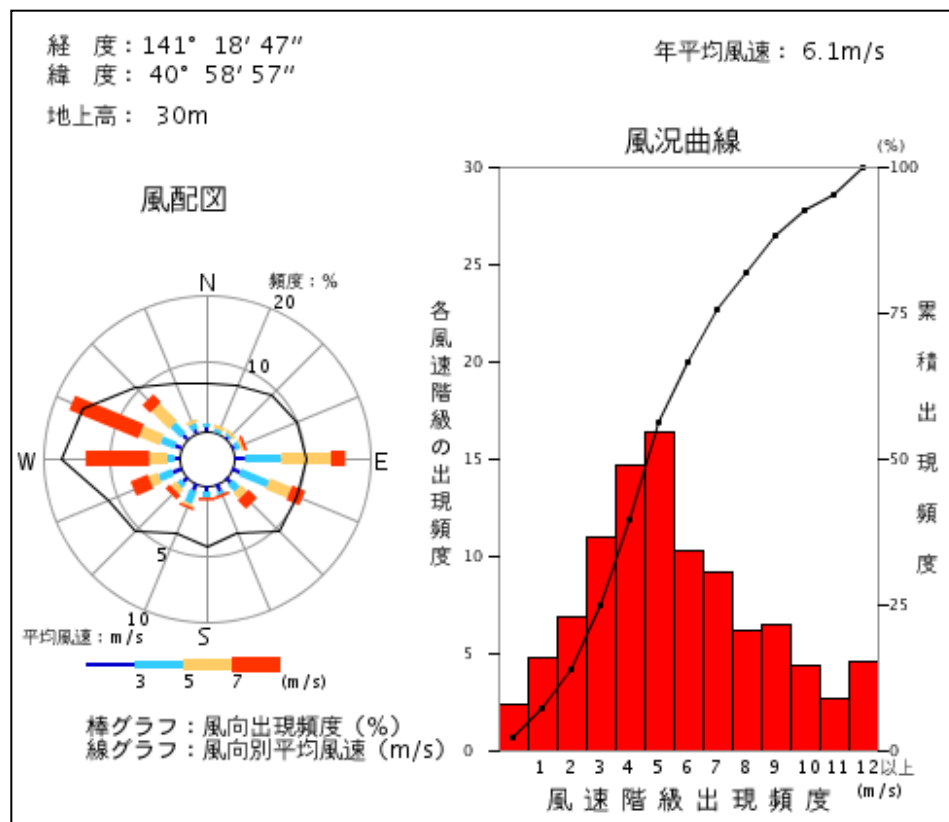
地上に比べて
高風速の分布が多い。

総時間：
10,071時間のデータ
(2航海分)

Fig.7 風車発電量試算に使用した風速分布(2航海分の合計)

地上の風況データ例

以下に示す風況データは、陸上の風況の例として、NEDOのHPより引用した、青森県六ヶ所村のウィンドファーム付近の風況分布グラフである。風車の運転に適した環境ではあるが、前述の航海上での風況分布とは大きく異なっている事が確認できる。



出典：
NEDO 局所的風況予想モデル
“LAWEPS”
HP
<http://app8.infoc.nedo.go.jp/top/top.html>

Fig.8 ウィンドファーム付近の風況の例

風車挙動予想

本風車は、風車用PCSによって、風車回転数を自動的に制御し、常に最適な運転が出来る事を狙って開発している。

風車とPCSとを組み合わせる事により、以下の様な風車の挙動が予想される。

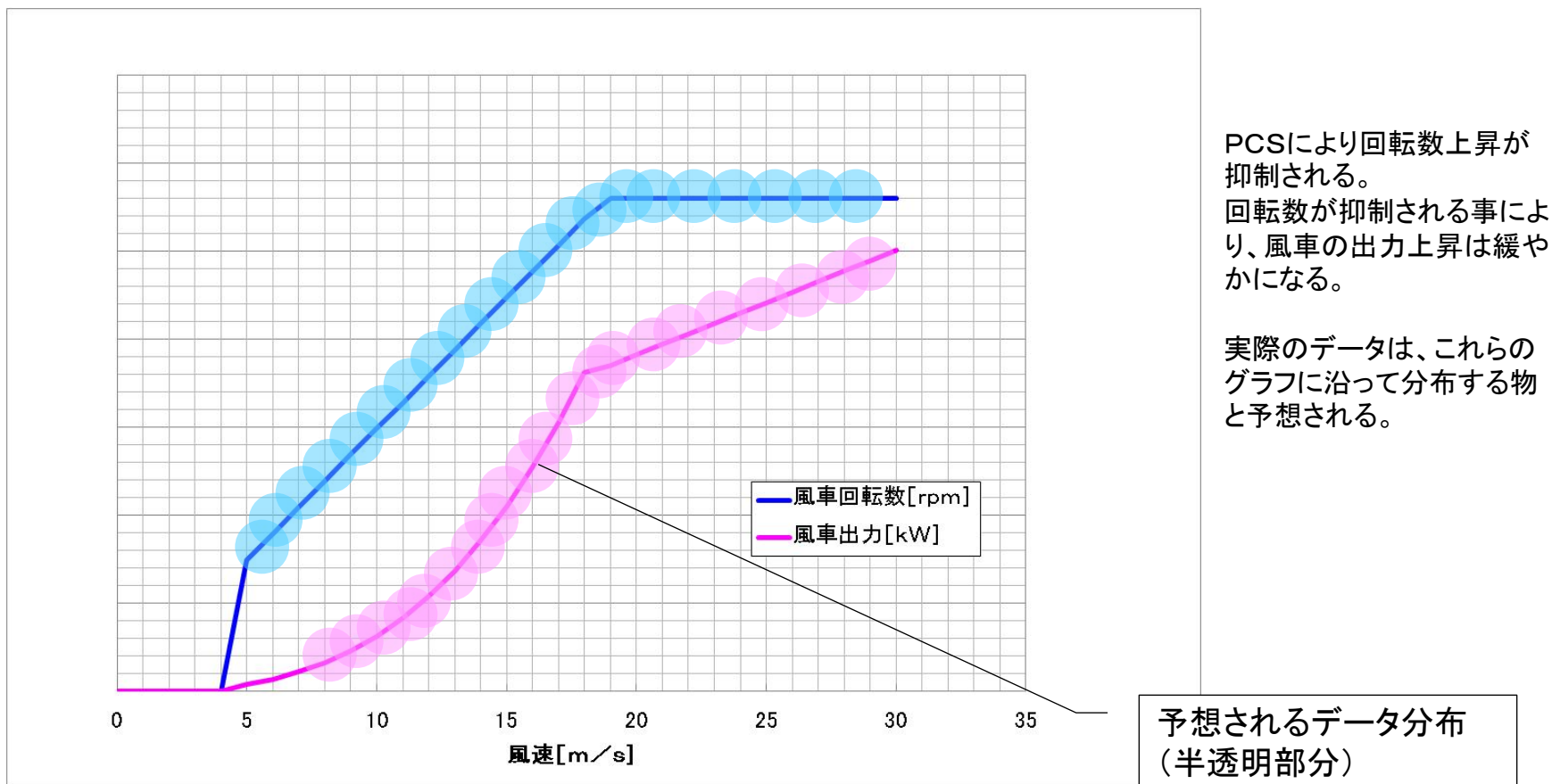


Fig.9 風車挙動予想

太陽光パネル出力予想

太陽光パネルに関しては、パネル本体の仕様は基本的に地上用の物と同じである。筐体に海水に対する耐性が付与されているが、基本的な構成、効率等に関しては、地上に設置されている太陽光パネルと同様である。

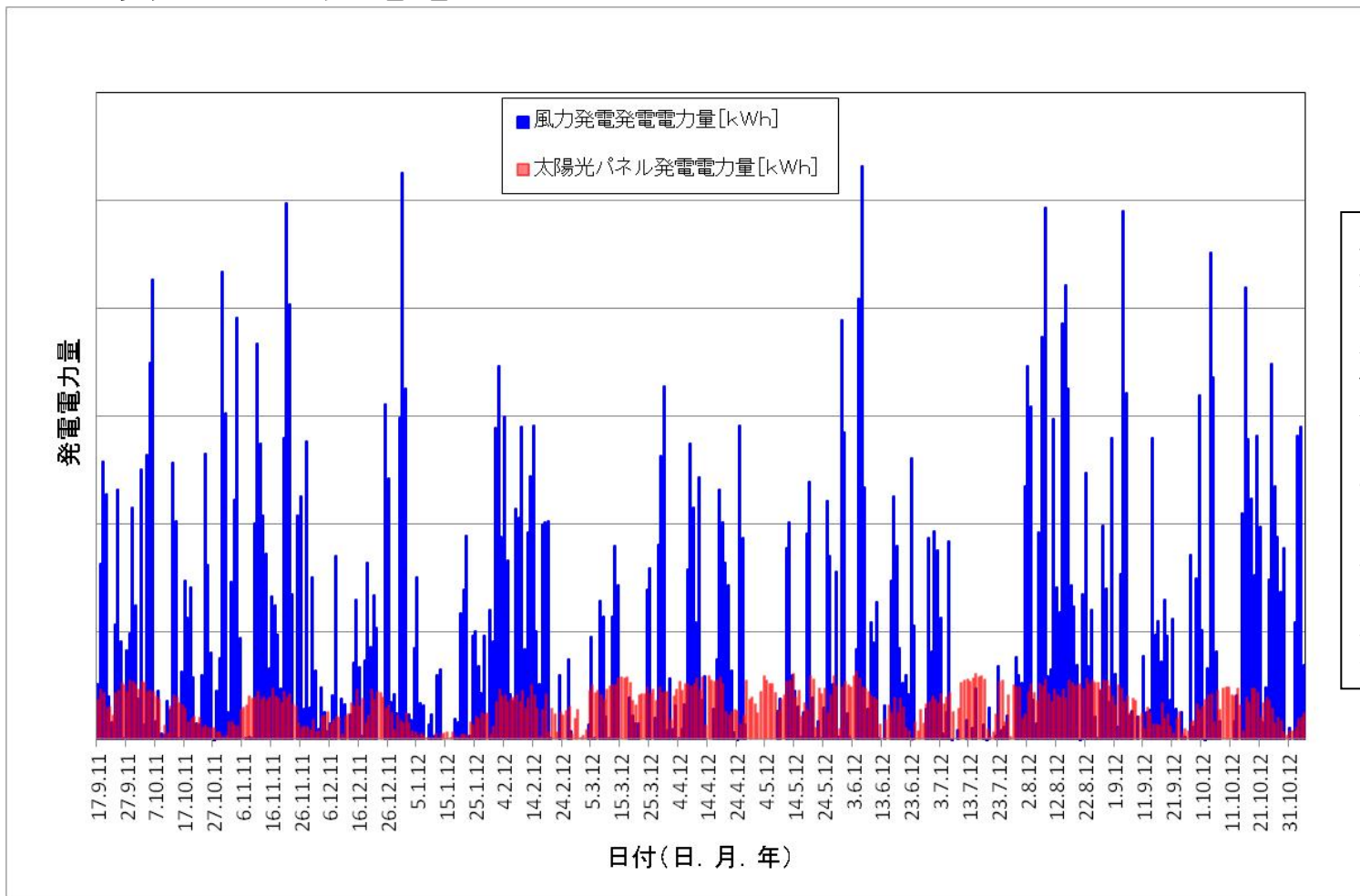
従って、船舶に取付を行ったとしても、太陽光パネルそのものの発電能力に関しては、日照量次第という事になる。

ただし、地上に設置されている太陽光パネルとの相違点として、地上用の太陽光パネルが、天候の影響以外では日射角の季節による変化のみに大きく影響されるのに対し、船舶に取り付けられた太陽光パネルに関しては、季節以外にも航行位置によって発電量に影響されると考えられる。

船舶が高緯度付近を航海中においては、日射角が浅くなる為、能力が低下し、低緯度付近を航行中においては、太陽光パネルの効率が大きくなる物と予想される。

7. 測定データ解析結果報告

データ取得期間 : 約1.1年
風車発電電力量 : 22000 kWh
太陽光パネル発電電力量 : 6500 kWh



風車の発電状態は船舶の航行状態、天候に大きく左右される為、基本的には安定し難い傾向が見て取れる。但し、最大発電量は太陽光発電の8.5倍程にもなる。

太陽光発電は比較的安定しているが、こちらも天候に能力が左右される。

Fig.10 発電量実績

風力発電電力量と平均風速の比較

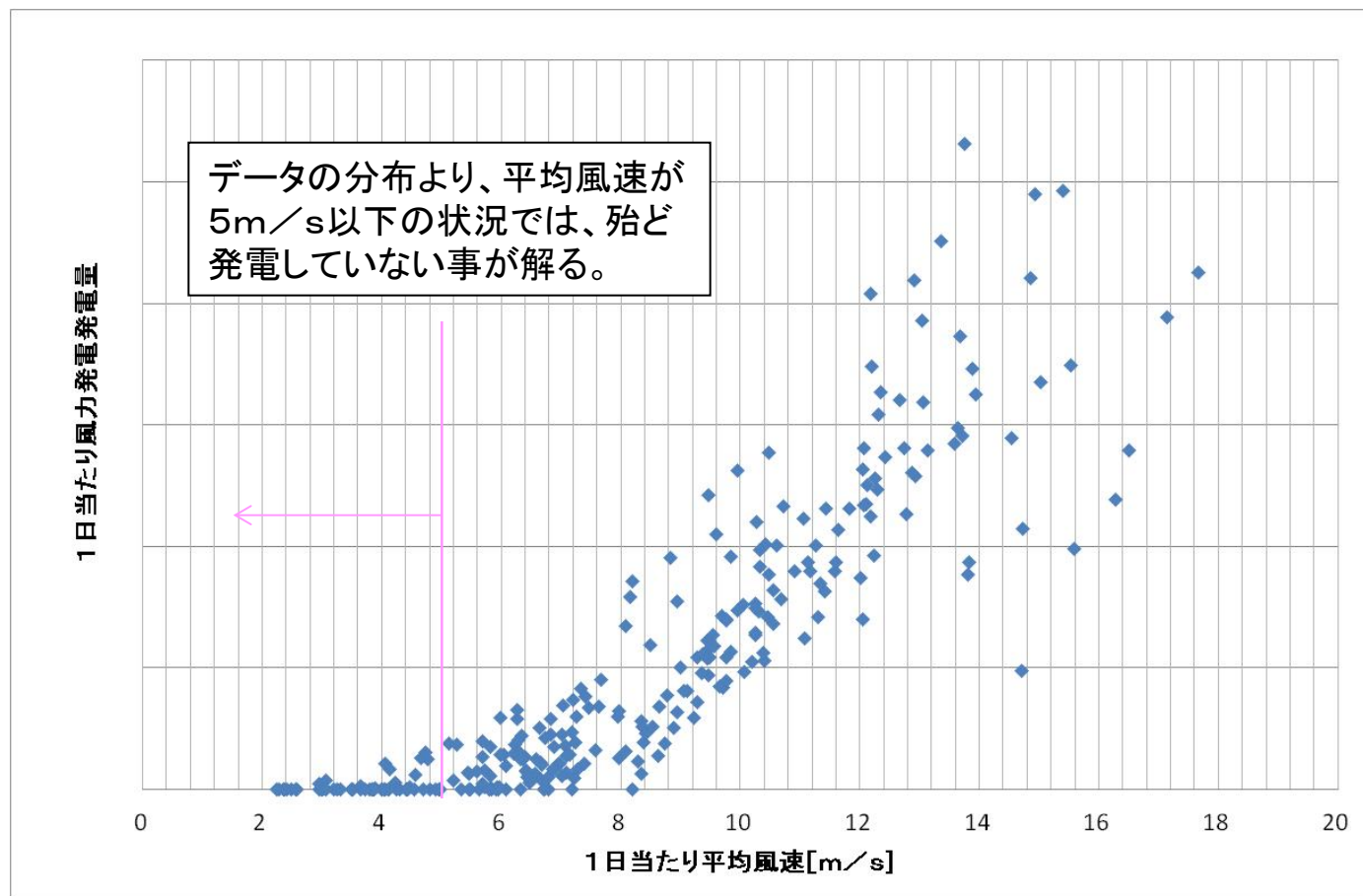


Fig.11 風車発電量と1日当たり平均風速

元来、本研究に用いた風車は、高風速に適する様に設計された風車であった為、低風速で効率良く発電できる様には作られていない。この事より、ある程度の風が吹かない限り起動させない様なシステムとしていた為、平均風速が低い状態では、殆ど発電しなかった物と考えられる。(風車起動条件: 風速7m/s以上)

風力発電出力状態の様子

風車回転数と風車出力の関係

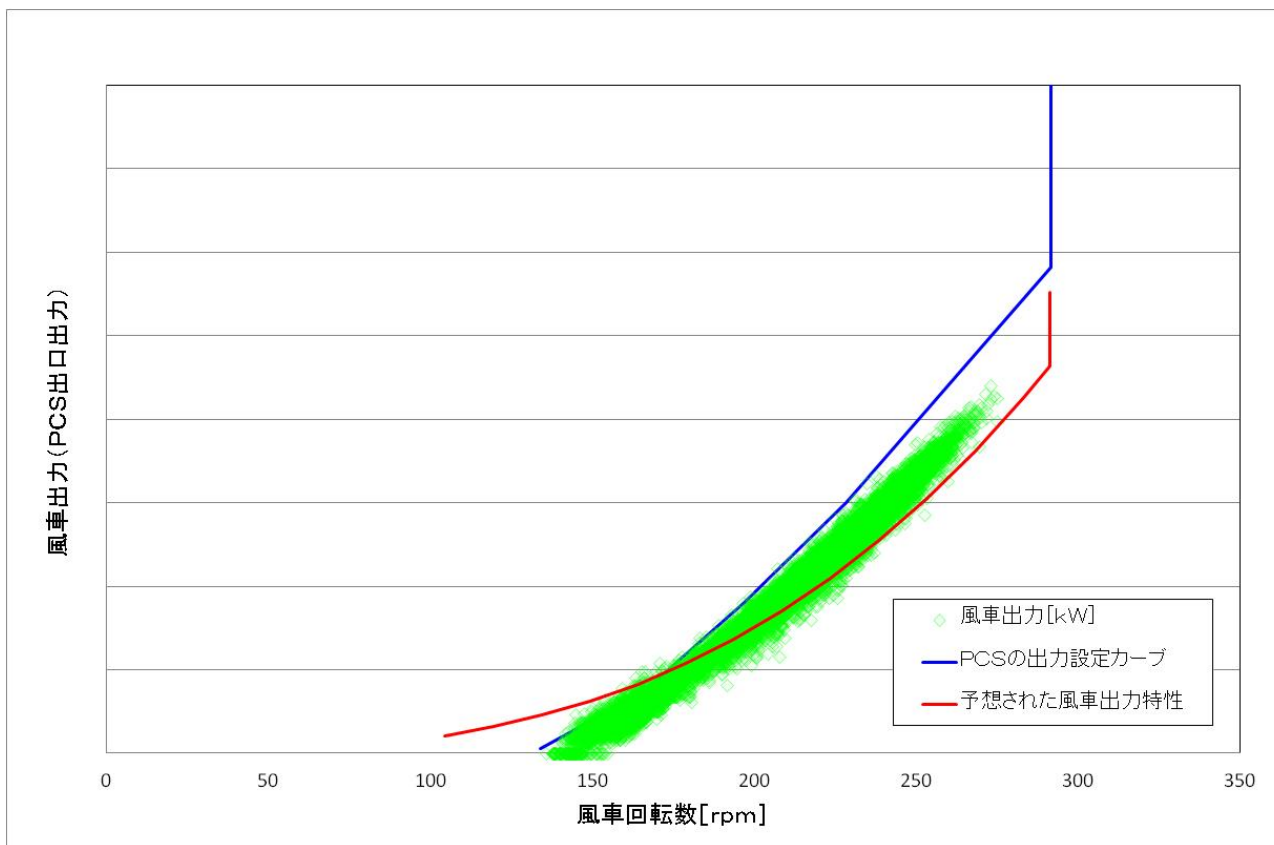


Fig.12 風車出力と風車回転数

グラフ中、青のカーブは、PCS内で設定した出力特性カーブである。PCSはこのカーブに沿って負荷を与えようとする。現在、高回転域では風車特性よりも大きめの負荷を与える様に設定している。その結果、200rpm以上では、PCSの出力カーブに引き上げられる様に、予想された風車出力よりも高い位置にデータが分布する事となった。PCS設定を風車特性とずらした理由は、考察にて説明する。

風力発電出力状態の様子

風速と風車出力の関係

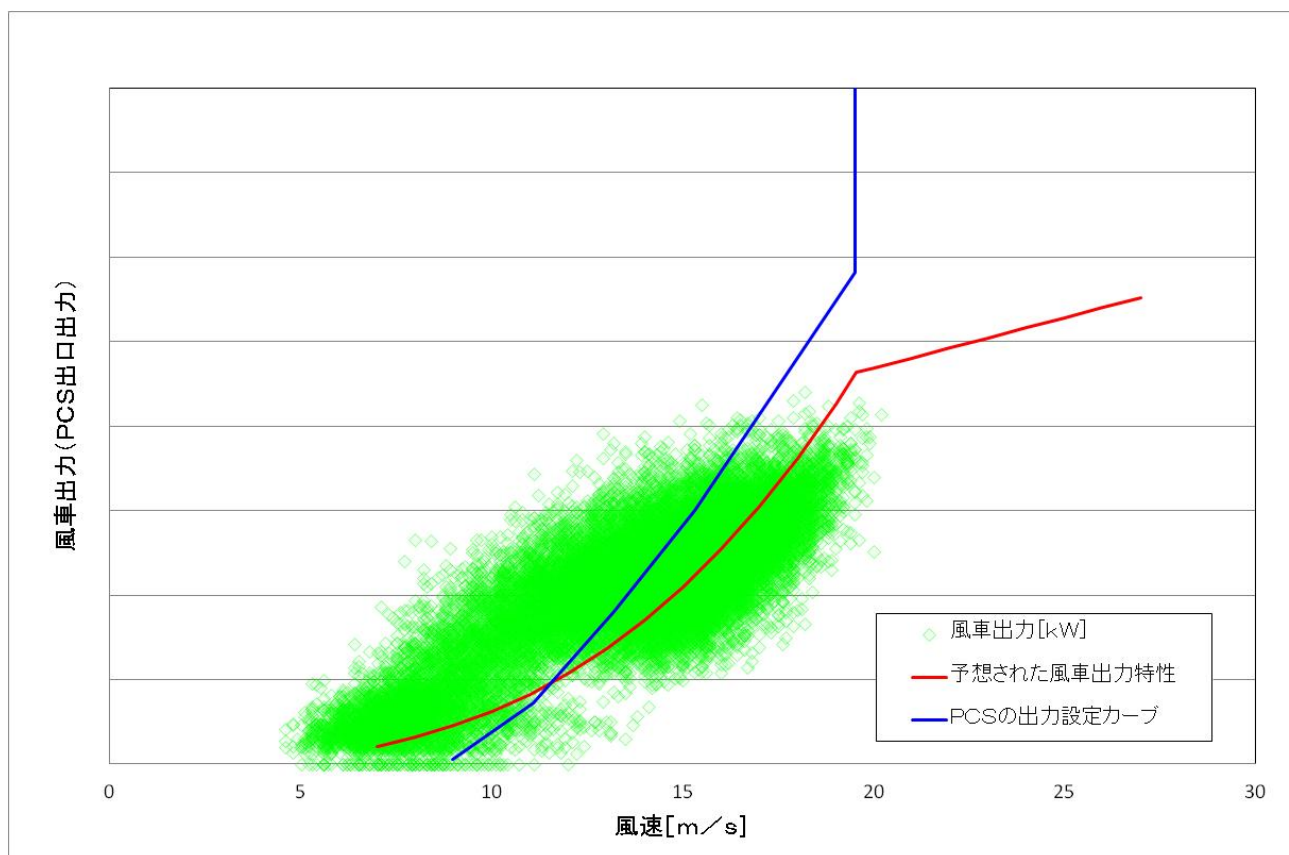


Fig.13 風車出力と風速

グラフ中、青のカーブは、PCS内で設定した出力特性カーブである。ただし、PCSは風速を感知して負荷を変動させている訳では無く、あくまで風車回転数に対して負荷を変動させている。従って、このPCS出力設定カーブは、風車の風速に対する回転数の特性を介した、間接的な物である。高風速においては、風車の出力特性よりも大きな負荷を与える事になる為、風車の回転速度が低下、結果、出力も低下したのと考えられる。

風力発電出力状態の様子

1日の出力と風速の様子

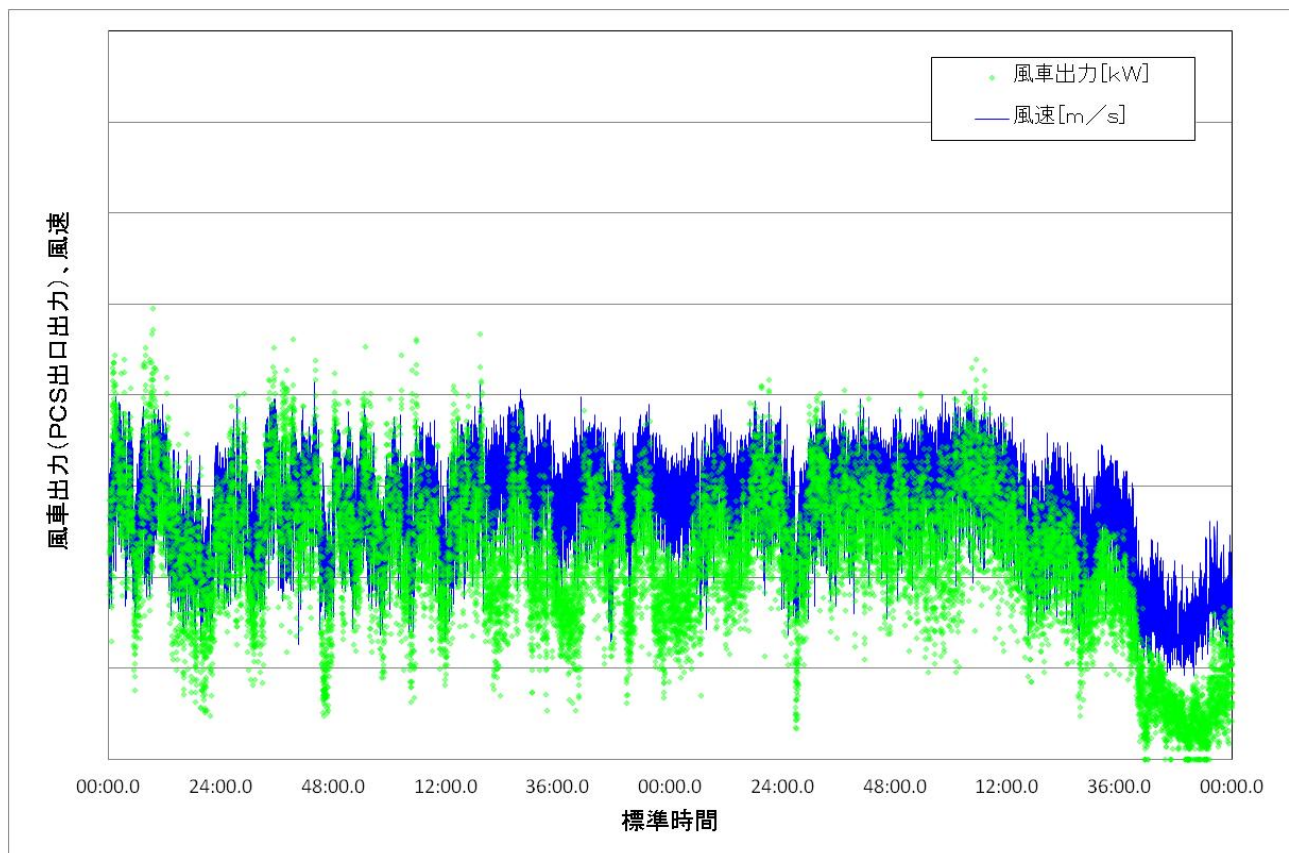


Fig.14 1日の風車運転の様子(最大発電量発生日)

グラフ中、緑の点が風車出力、青い折れ線が風速、それぞれの瞬時値を示している。風速の変動にほぼ沿った形で風車の出力が推移している事が解る。

この日、1日当たりの風車発電量が最大となったが、高めの風速が安定して存在していた事、1度も風車が停止しなかった事等により、風車発電量が大きくなった物と考えられる。

実際の風速分布状況

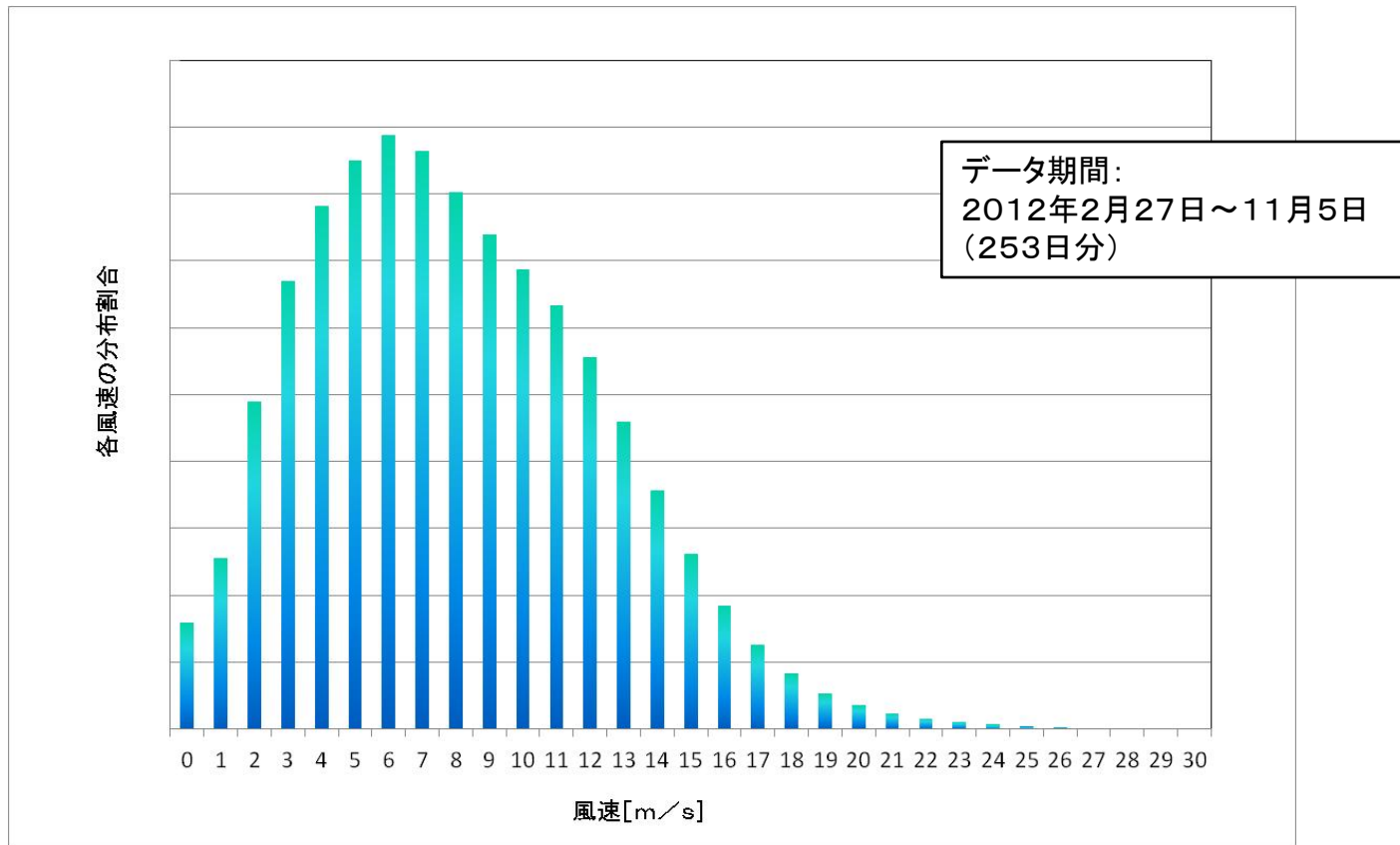
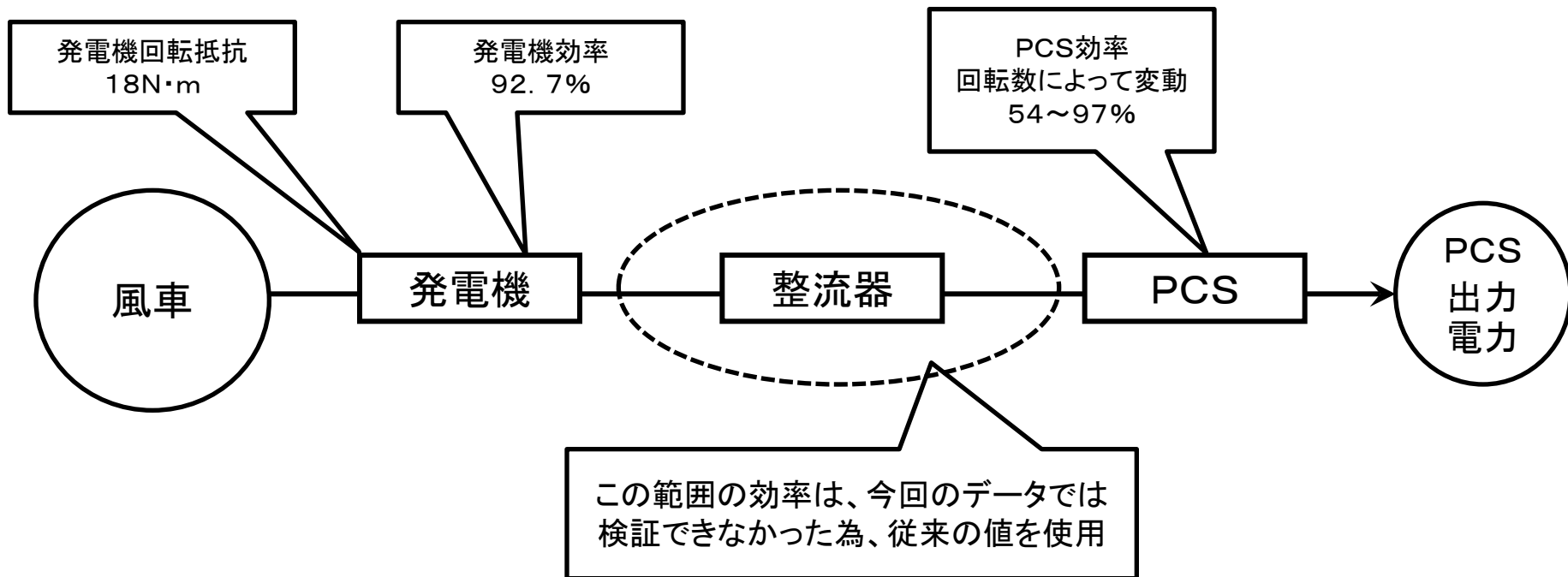


Fig.15 実際に測定された風況データ

上記グラフは今回得られたデータ中、風速計の変更以降、風速が正常に記録できるようになった後の風速分布状況を示している。

陸上と比べ、全体的に高い風速分布時間が多くなっているが、当初予想に使用していた風況分布とは様子が異なり、高風速での風速分布が極端に多いと言った事は確認されなかった。

発電機からPCSまでのシステムに関する効率計算



発電機 回転抵抗による 効率	発電機効率	ケーブル ロスA	整流ロス	ケーブル ロスB	PCS効率	最終効率
0.72~0.99	0.927	0.99	0.95	0.99	0.54~0.97	0.34~0.83 (34~83%) 平均71.3%

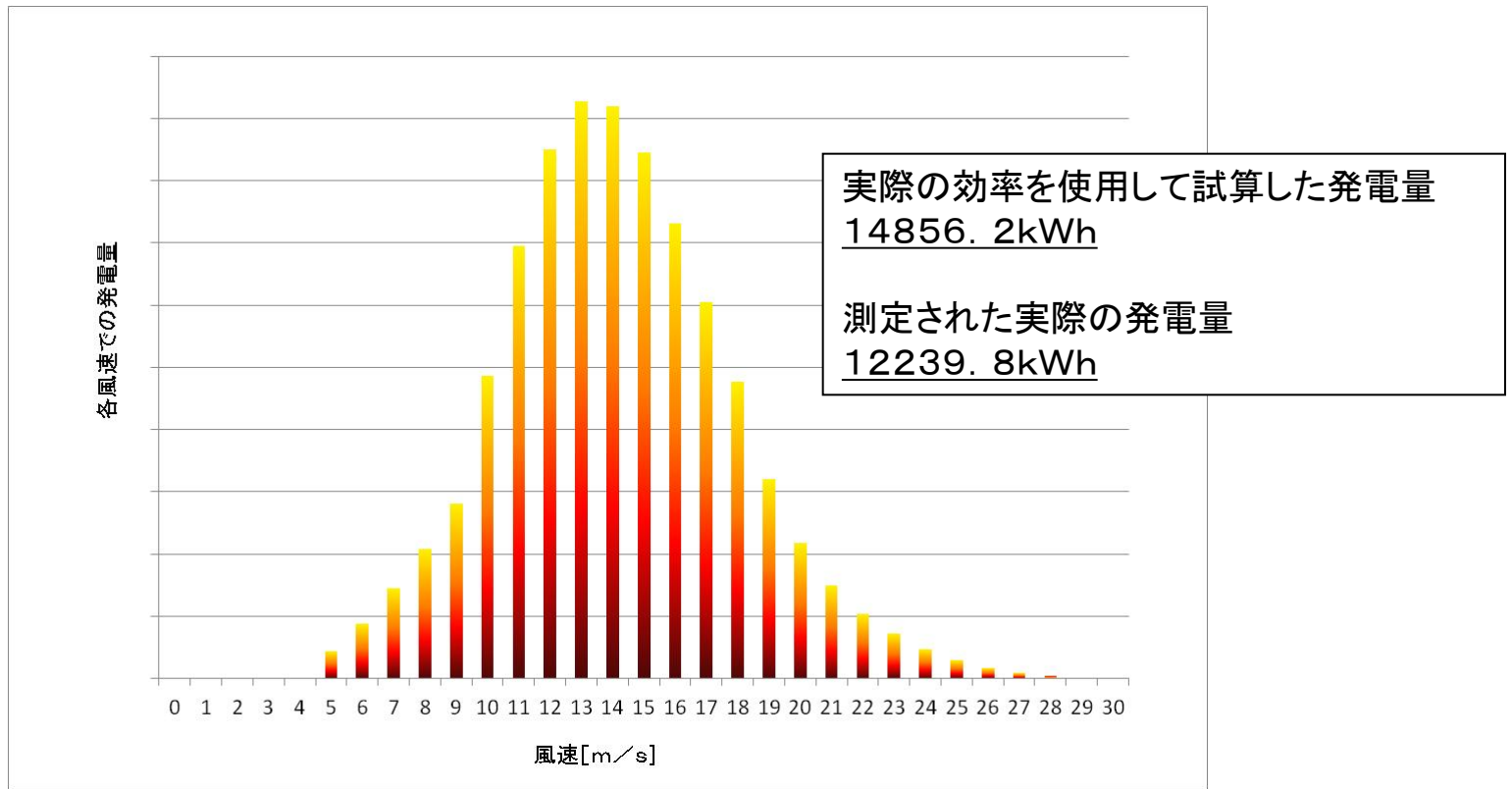


Fig.16 予想していた発電効率と、実際の発電効率の差

このグラフは、今回得られた風況分布に、実際の運転から算出したシステム効率を反映させて、各風速における発電量をプロットした物である。

発電量のピークは、13~14m/sにある事が確認される(風況のピークは6m/s)。

新たに算出した効率で発電量を試算すると、予想発電量に対し、実際の発電量は82.4%となった。

8. 考察

風車出力について

前述の通り、今回取得したデータにおいては、実際の運転時間における風車の出力が、予想された出力量の約82.4[%]になった。この原因については、本風力発電システムが、高風況下における風速の変動に対し、十分に対応できなかった事に依る所が大きいと考えられる。

高風況下においては、風速の変動が大きく激しい為、ストール制御が間に合わず、風車の制限回転数に達する現象が確認されている。この為、ストール制御開始以前から、大きめの発電負荷を与え、風車回転数を抑制する様な制御を行った(Fig.12、Fig.13中青いカーブ)。この事により、PCSの出力特性は風車の特性と離れた物となり、効率的な運転が出来なかった。

従って、高風速域での風速の激しい変動に十分に追従、対応出来るシステムを構築する事が出来れば、PCSの出力特性を風車本来の特性に近づけられる事になる為、結果的にシステム効率の向上も見込めると考えられる。

高風況下の風速変動に十分対応できる風車・システムを構築する事が、船舶上の様な強風の発生する頻度が非常に多い状況において、発電量増加およびシステム効率向上両方の面で、最も重要である。

太陽光パネル発電量向上について

太陽光パネルに関しては、今回のデータを見る限り、風車と比較して安定した電力を発生する事が確認された。

但し、太陽光パネルは日照量に完全に依存しており、船舶が航行している地点の天候、季節、緯度に大きな影響を受ける事が明らかとなった。

特に、高緯度付近での出力の低下は顕著であり、高緯度近辺を航行する船舶にとっては大きなデメリットになると考えられる。

高緯度においては日射角が浅くなる為、太陽光パネルに角度を付ける事によりある程度の効率上昇は予測できるが、航海中の船舶においては、船体の揺れ等によって常に傾きが変化している為、あまり現実的では無いと考えられる。

また、太陽光パネル自体に関しては、日射量が増加すると、効率が低下するという特性が確認された。これは、日射量の増加に伴い、パネルの温度が上昇してしまう為と考えられる。

低緯度付近では日射量も多く、多くの発電量が見込めるが、実際には効率が良くない状態での運転を続けていたと考えられる。

低緯度付近において、太陽光パネルの温度が上昇した場合に散水する、もしくは太陽光パネル裏面にヒートシンクのような熱交換器を取り付けて温度上昇を防ぐ事により、数%程度の効率の上昇が見込める。

低緯度付近を航行する事が多い船舶にとっては、有効であると考えられる。

PCSに関しては、日射量の増加に伴い、効率も上昇するが、これは日射量が増加する事により、太陽光パネルの出力電圧が上昇し、PCS定格電圧に近づく為と考えられる。

9. まとめ

本研究は、殆どデータの無い、船舶上に風車を取り付けた際の運転状況、運用について調査を行い、風車並びに太陽光パネルの船舶への導入について検討を行った物である。

本研究に使用した風車は、船舶用として開発した製品であったが、特に発電機及びPCSは十分に性能を発揮できず、課題が残る結果となった。

しかしながら、短い期間ではあるものの、実際に船舶に風車を搭載し運転させた事により、船舶用風車としての要求事項が明らかになりつつあり、また、船舶に風車を搭載し、有効に運用できる可能性が確認できた。

太陽光パネル、風車共に船舶の航行状態、天候に大きく影響を受けるが、風車の場合は航行位置的な影響は受けにくい事が判明し、太陽光パネルに関しては風車以上に航行位置、特に緯度に影響を受ける事が判明した。

但し、日射量が全くない日はまれであり、比較的安定して発電できるのが太陽光パネルの魅力である。

一方、発電量に大きな変動があるものの、その占有面積から考えると、風車の持つ可能性は太陽光パネルをしのぐ物である事が予想される。

今後、よりいっそうの環境対策が求められる世界情勢の中、風車や太陽光パネル、それぞれの長所を組み合わせたシステムを構築し、エネルギーを有効活用していく事が、船舶の持続可能な発展の為にも必要になると考えられる。

風車、太陽光パネル 長所と短所

長所

風車	太陽光パネル
<p>効率</p> <ul style="list-style-type: none"> ・設置面積当たりの発電量が、太陽光パネルより大きい <p>安定</p> <ul style="list-style-type: none"> ・航行位置には大きな影響を受けない <p>革新</p> <ul style="list-style-type: none"> ・発電量増加、高効率化への改善余地が大きい 	<p>効率</p> <ul style="list-style-type: none"> ・発電量試算が容易 <p>安定</p> <ul style="list-style-type: none"> ・(日照時は)安定した発電量が期待できる。 ・航行状態(姿勢)に大きな影響を受けない。 ・平面構造であり、殆ど風の抵抗を無視出来る。 <p>保守</p> <ul style="list-style-type: none"> ・作動部が無い為、設置、メンテナンスが容易

短所

風車	太陽光パネル
<p>効率</p> <ul style="list-style-type: none"> ・発電量試算が難しい <p>安定</p> <ul style="list-style-type: none"> ・航行状態(姿勢)に大きく影響を受ける ・発電量は太陽光パネル程安定しない ・構造が立体的になる為、設置位置に注意する必要がある。 <p>保守</p> <ul style="list-style-type: none"> ・回転体が露出する為、安全管理が必要 ・機械部分の定期的なメンテナンスが必要 	<p>効率</p> <ul style="list-style-type: none"> ・設置面積当たりの発電量が風車に比べ少ない。 ・夜間は発電しない。 <p>安定</p> <ul style="list-style-type: none"> ・航行位置(日射角)に大きく影響を受ける。 <p>保守</p> <ul style="list-style-type: none"> ・表面の汚れにて効率変化。 <p>革新</p> <ul style="list-style-type: none"> ・効率改善の余地が少ない

謝辞

本研究開発は、日本海事協会、今治造船株式会社、株式会社前川製作所との共同研究体制により研究を行うとともに、日本海事協会の「業界要望による共同研究」のスキームにより同協会の研究支援を受けて実施いたしました。

関係企業様、関係各部署様におかれましては、多大なる御協力を頂きました事、この場を持って挨拶にかえさせて頂きます。誠に有難うございました。

特に、風車並びに太陽光パネルの船舶への搭載を快諾して頂きました、正栄汽船株式会社様におかれましては、多大なる御協力を頂き、心より感謝申し上げます。

また、本船「M. V/MORNING CRYSTAL」キャプテン並びにクルーの皆様におかれましては、運転調整並びに運転データ取得に関しまして、親切に対応して頂き、御協力頂きました事、心より感謝申し上げます。

本船の航海の安全をお祈り申し上げます。

以上