



# 海洋開発工学概論

海洋再生可能エネルギー開発編

改訂第2版

2021年3月

本教材は、平成 29 年度国土交通省委託事業「海洋開発技術者育成のための基盤整備業務」において作成されたものです。

なお、「改訂第 2 版」は 2020 年（令和 2 年）12 月時点で東京大学大学院新領域創成科学研究科海洋技術環境学専攻 鈴木英之教授の監修の下、日本財団オーシャンイノベーションコンソーシアムと一般財団法人エンジニアリング協会が改訂・情報更新をしたものです。

## 序

本教材「海洋開発工学概論」は、国土交通省委託事業「海洋開発技術者育成のための基盤整備業務」において作成されたものです。本事業においては、「海洋開発人材育成 カリキュラム・教材開発に関する検討委員会」（委員長 東京大学 鈴木英之教授）を設置して、整備すべき教材等の構成に関する検討を行いました。

本教材の具体的な内容については、同検討委員会の下に設置した「海洋資源開発ワーキンググループ」（座長 国際石油開発帝石株式会社 三輪正弘 ジェネラルマネージャー）、「海洋再生可能エネルギー開発ワーキンググループ」（座長 海上技術安全研究所 井上俊司 系長）、「海洋開発技術ワーキンググループ」（座長 海上技術安全研究所 正信聡太郎 系長）を中心に、検討・作成作業を行いました。

本教材は、理系の学生を対象とし、海洋資源開発、海洋再生可能エネルギー開発について、それぞれのプロセス、必要となる施設や機器の構造、構成するシステムについて技術的な側面から理解をするとともに、「海洋開発で必要となる技術を抽出」し、その内容について理解を深めることを目的としています。

本教材は、海洋開発技術編、海洋資源開発編、海洋再生可能エネルギー開発編で構成されており、基礎的な数学科目などを一通り履修しこれから専門科目を学び始める方については導入書となるよう、既に専門科目を履修した学生にとっては実際の応用の現場と専門科目との関連を改めて理解するための参考となるよう編纂しています。

また、海洋開発は非常に幅広い学問領域を含むため、皆さんの今勉強していること、興味のあるところから読み進めることを勧めます。

例えば、石油工学を専門に扱う学部／大学院の方は海洋開発資源開発編から、再生可能エネルギーを専門に扱う学科／研究科の方は海洋再生可能エネルギー開発編から入り、海洋における開発に特有の技術をより深く知るために海洋開発技術編に移る、海洋開発を専門に扱う学部／大学院の方は、専門科目のおさらいとして海洋開発技術編を読み、実際に現場で必要となる知識をより広く知るために海洋資源開発編や海洋再生可能エネルギー開発編に移るなどすると良いでしょう。

時間が無い方、どこから読んだら良いか分からない方は、海洋開発技術編の2章にある「技術マップ」を中心に、まずは、俯瞰的に海洋開発を見てみると良いでしょう。

このほか、文系学生も含め、海洋開発に関する基礎的知識を習得し、産業の全体像を掴むことを必要とする方は「海洋開発産業概論」を、海洋開発のビジネス特徴、プロジェクトマネジメント手法を学習したい方は「海洋開発ビジネス概論」を参照すると良いでしょう。

本教材作成にあたってご協力頂いた関係各位に心から謝意を表するとともに、本教材を通じて、学生の皆さんが海洋開発産業に関心を持ち、この分野に進むきっかけを得ることを心より期待します。



# 目次

1	序論	1
1.1	人類にとってのエネルギーとその歴史	1
1.2	再生可能エネルギーとは	1
1.3	再生可能エネルギー発生 の原理	2
1.4	本書で取り上げる洋上再生可能エネルギー利用の形態	3
2	海洋の風・波・流れ	5
2.1	エネルギーポテンシャルの評価法	5
2.1.1	風と流れ	5
2.1.2	波浪	16
2.2	設計条件の設定法	22
2.2.1	風況	22
2.2.2	波浪	24
2.2.3	風と波の関係	25
2.2.4	流況	27
2.3	気象海象の現地観測法	29
2.3.1	風況	29
2.3.2	波浪	32
2.3.3	流れ	35
2.4	洋上施工と気象海象の関係	41
2.4.1	洋上施工と作業船	41
2.4.2	静穏海象発現特性の評価法	43
参考-1	不規則波のエネルギーとパワー	44
参考-2	極値統計解析の手順	46
参考-3	逆一次信頼性解析法	50
3	洋上風力発電システム	55
3.1	概説	55
3.1.1	風車の基礎知識	55
3.1.2	技術・開発の歴史	68
3.1.3	基準・規格と認証	76
3.2	着床式洋上風車	80
3.2.1	支持構造形式	80
3.2.2	安全性	85

3.2.3	設置工事	95
3.2.4	維持管理	105
3.3	浮体式洋上風車	109
3.3.1	支持構造形式	109
3.3.2	浮体特有の安全性	115
3.3.3	設置工事	127
3.3.4	維持管理	130
4	波力発電システム	139
4.1	概説	139
4.1.1	技術の歴史	139
4.1.2	構造形式	145
4.1.3	発電機構	151
4.2	振動水柱型	163
4.2.1	波エネルギー吸収の基本メカニズム	163
4.2.2	数値計算技術	168
4.2.3	水槽実験技術	171
<b>参考</b>	<b>振動水柱型の基本メカニズムの定式化</b>	174
4.3	可動物体型	185
4.3.1	波エネルギー吸収の基本メカニズム	185
4.3.2	数値計算技術	189
4.3.3	水槽実験技術	189
<b>参考-1</b>	<b>可動物体型の流体力学特性</b>	194
<b>参考-2</b>	<b>可動物体型の制御理論（詳細）</b>	198
5	潮流・海流発電システム	206
5.1	概説	206
5.1.1	技術の歴史	208
5.1.2	構造形式	211
5.2	水平軸型	216
5.2.1	基本メカニズム	216
5.2.2	数値計算技術	217
5.2.3	水槽実験技術	221
5.3	垂直軸型	224
5.3.1	基本メカニズム	224
5.3.2	数値計算技術	227
<b>参考</b>	<b>垂直軸型の翼素運動量理論</b>	228
6	その他の発電システム	236
6.1	潮汐発電	236

6.1.1 基本メカニズム .....	236
6.1.2 構造形式 .....	242
6.1.3 開発事例 .....	246
6.2 海洋温度差発電 .....	251
6.2.1 技術の歴史 .....	251
6.2.2 構造形式 .....	253
6.2.3 開発事例 .....	263
索引 .....	268

尚、本書で紹介している企業名・業務内容などは2017年12月末時点の情報に基づき記載しております。





### 1 序論

#### 1.1 人類にとってのエネルギーとその歴史

エネルギーとは、物体・物質の位置や状態を変化させるための仕事の源であるが、人類が火を手にして、それによって暖房や調理を行うことを覚えた原始時代から、産業革命後の動きに至るまで、人類の文明の発達はエネルギー利用の発展と共にあった。

我が国においては、民生用の熱エネルギーは永らく薪炭に依存したが、19世紀後半から産業用においては石炭と水力の利用が進んでいった。その後、20世紀後半の重工業化の時代に入ってから、高性能な化石エネルギーとして、石油さらには天然ガスへと主力が切り替わっていった。一方、1954年の原子力三法の制定によって、東海村に始まる原子力発電の歴史も始まった。1973年の第四次中東戦争により産油国の輸出制限が始まり、石油価格が高騰していわゆるオイルショックによる経済危機が訪れた。これを契機に、我が国ではエネルギー自給率を高めるため、原子力に加えて再生可能エネルギーの利用促進が政策に上がった。欧米諸国では、多様な自然エネルギーが意識されたが、我が国ではこの段階で主として注目されたのは太陽光発電であった。

ここで、もう一方の再生可能エネルギーの旗手である風力に目を向けると、帆による船の推進への利用が最も古い形態と目されるが、風車を用いた風力利用も、3千年以上前の古代文明下で使われていたとされる。明確な書類証拠があるものとしては、12世紀に欧州で製粉や揚水用として使われ始めた物がある。19世紀の初めまでに、オランダにおいては約10,000台の風車が使われ、英国でも同程度以上の風車が使われていたと考えられている。19世紀後半には、各国で風力発電が誕生し、デンマークを中心に発展した。1970年台のオイルショック以降、再開発が活発化し、1980年以降の環境問題を捉えて、開発が更に加速した。

#### 1.2 再生可能エネルギーとは

ここで一度、「再生可能エネルギー」とは何か、その特徴は何か、を見ていきたい。

「再生可能エネルギー」とは、太陽光、太陽熱、地熱、水力、風力、海潮流、潮汐、波力、バイオマスなど、いくら使用しても自然の力によって再生されるため無尽蔵に得られるエネルギーのことを指す。他方、有限で枯渇するエネルギー源として、石油、石炭、天然ガス、ウランなどがある。

エネルギー源の多様化とベストミックスのためには、再生可能エネルギーは重要な位置を占めると言われている。再生可能エネルギーは、地理的な偏在性が小さいという長所があるが、エネルギー密度が低いという短所がある。したがって、前者に対しては、地理的に従来型のエネルギーを保有しない国、後者に対しては、それを克服する技術的ポテンシャルを持つ国に適合性が高く、我が国がこれに当たるとして何の疑いもない。

比較的短期間で効果が期待できるのは、設置場所や設置規模の多様性が高く、設置工事も簡便な太陽光発電である。しかし、太陽光発電は他の電源と比較すると、現段階では、発電コストが割高なので、再生可能エネルギー源の大部分を太陽光発電に依存すると、電力料金の国

## 第1章 序論

民負担が大きくなるというデメリットがある。再生可能エネルギー先進国の欧州を筆頭に、米国、中国などでは、太陽光の発電原価よりも風力の発電原価の方がはるかに安いことが主な背景となり、世界の潮流は今や風力発電になっている。

海潮流、波力、温度差、潮汐等の海洋エネルギーは、海洋を保有する国のみが享受できるエネルギーであり、国土面積の12倍に当たる面積の排他的経済水域（EEZ: Exclusive Economic Zone）を有する我が国では、当然これに留意しなければならない。オイルショック以降、我が国では海洋エネルギーに関する幾つかの研究が行われて世界をリードする時期もあった。しかし、石油価格の安定化と共に、その開発意欲は急速に減退し、研究も消散してしまった。近年、世界の状況に触発される形で我が国での実用化に向けた取り組みが少しずつ復活している側面もある。

### 1.3 再生可能エネルギー発生原理

再生可能エネルギーの源は太陽である。太陽から、地球に1秒間に $175 \times 10^{12} \text{kW}$ のエネルギーが降り注いでいる。この1秒間のエネルギー量は、現在地球上で利用されているエネルギーの需要量の約10,000年分に当たる。太陽から地球へのエネルギーの流れを図示すると、図1.3.1のようになる。地球に降り注ぐ太陽エネルギーの約30%は直接宇宙に反射され、約47%が大気、陸地や海洋に熱として一旦吸収され、約23%は大気中の水移動での潜熱として一旦吸収されるが、それらの大部分は最終的には宇宙に熱放射されている。植物の光合成に回っているのは、全体の約0.02~0.03%に過ぎないが、薪炭から化石燃料に至るまで、人類は永くこのエネルギーに頼っている。また、太陽エネルギーの約0.2%が、風、波、海流を起こすエネルギーとなっている。本書で論じようとしている風、波、海流のエネルギー、あるいは、海水熱そのもののエネルギーが、従来の薪炭や化石エネルギーの起源より遥かに大きいことが分かる。風、波、海流が、どうして太陽エネルギーによって出来るのかということ、もう一言ずつ補足しておくと、風は太陽熱によって生じる大気対流から生まれ、波は風が海面を撫でることによる風から海水への運動エネルギーの移動によって生まれ、海流は太陽熱によって生じた海水温の不均一性から生じる海水対流および風による駆動力によって生まれる。

一方、潮汐・潮流は、よく知られているように、地球外の天体（主として月と太陽）の存在によって発生する現象であり、天体の引力に起源がある。

化石エネルギー利用においては、その地中探査がまずは重要であるのと同じく、上記の原理を踏まえると、太陽エネルギーや天体引力が生む再生可能エネルギーがどのように存在するか、すなわち、関連する気象・海象について把握することは、再生可能エネルギー利用においてまず重要である。これについては、第2章で取り上げる。

# 第1章 序論

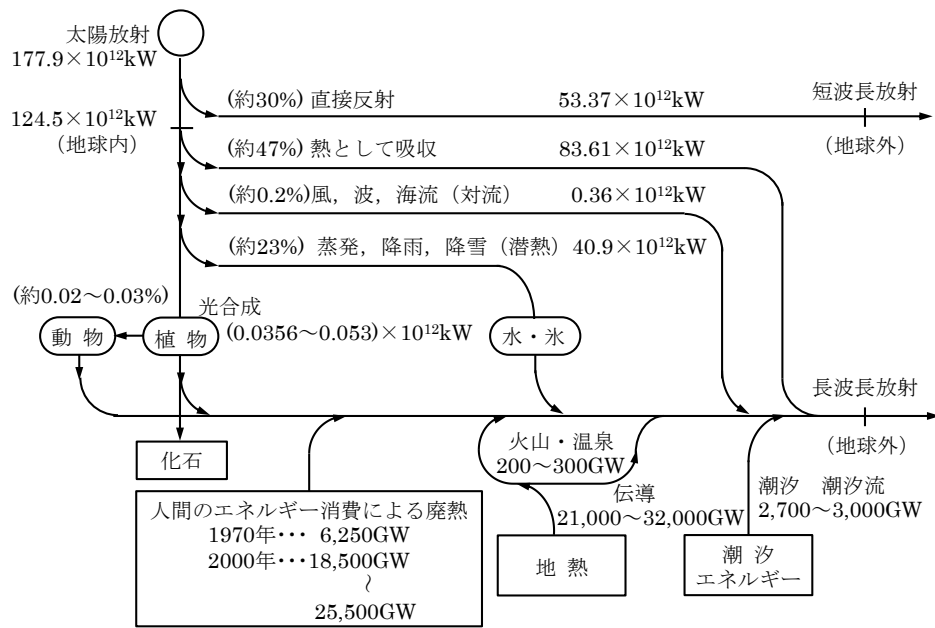


図 1.3.1 太陽から地球へのエネルギーの流れ  
(出典：近藤一郎、1996 による図を参考に作成)

## 1.4 本書で取り上げる洋上再生可能エネルギー利用の形態

再生可能エネルギーを現在の社会システムの中で利用可能な形にするのに、最も主流であるのが電気に変換することである。その他の、例えば水素等のエネルギー形態に変換する場合にも、まず電気を作って、そこから再変換することが多く、その意味で本書では、基本的には発電システムを想定して説明する。

まず、洋上風力発電であるが、これは風の運動エネルギーで羽根車（ロータ（rotor））を回転させることで動力エネルギーを得るものである。陸上も含めた総量でみた場合、世界的には風力発電は太陽光発電の何倍ものスピードで導入が進んでおり、再生可能エネルギーのトップランナーの地位にある。数十基の風車を並べたものをウィンドファームといい、世界的には洋上も含めて数多く稼働している。洋上風力発電については、第3章で取り上げる。

波のエネルギーを利用するのが波力発電であるが、これには多様な方式がある。波は一種の振動現象であり、水粒子が運動エネルギーと位置エネルギーを刻々と交換しながら全体として波動している現象である。これを運動エネルギー主体で捉えるか、位置エネルギー主体で捉えるかによって基本方式が異なり、また往復動であるがゆえに、その機構に関しては数多くのアイデアが考案されており、我が国および欧米で開発競争がなされている。風力に比べて比較的小規模でも高効率を得られる可能性があることや、海域制御（静穏域形成）と兼ねたシステムが実現しうることに加え、地理的な偏在性が小さいことなどから、大規模電源とは異なる立場での利用にも期待がある。波力発電については、第4章で取り上げる。

次に、潮流・海流発電であるが、これは流れからエネルギーを取得するという観点からは、

## 第1章 序論

基本技術が風力発電と共通な部分が多く、水中というハンディキャップは大きいが取り組みやすい技術分野と考えられている。潮流の場合には、海峡等を選べば高い流速が得られ発電効率が向上しやすいが、適地が限られ、賦存エネルギー総量についても限定的である。海流の場合には、黒潮等を利用すれば大きな賦存エネルギー総量が期待できるが、離岸距離や水深等の立地条件も勘案すれば適地もやや限定的である。潮流・海流発電については、第5章で取り上げる。

その他の発電システムとして、第6章では、潮汐発電と海洋温度差発電（OTEC：Ocean Thermal Energy Conversion）を取り上げる。潮汐発電は、潮汐によって発生する海水の位置エネルギーを利用するもので、基本技術がダム水力発電と共通な部分が多い。潮位差が大きく、できれば海岸地形を有効活用できる立地を選択する必要があるが、我が国では事業化が視野に入るような適地が現在のところは少ない。海洋温度差発電は、地熱発電と同様の安定性と高稼働性、海洋深層水との複合利用、スケールメリットによる経済性などの観点で、我が国や欧米で研究開発が進められている。

### <参考資料>

- 近藤一郎，上原春男，木方靖二，宮崎武晃，谷野賢二．海洋エネルギー利用技術．森北出版，1996，185p.

## 第2章 海洋の風・波・流れ

### 2 海洋の風・波・流れ

海洋の風、波、流れ（潮流と海流）は、大きなエネルギーを内包する資源であるが、洋上に設置される施設は、それらが与える大きな外力に備えた設計や影響を考慮した施工をしなければならぬ。そこで本章では、資源という面と設計・施工条件という面に着目し、気象学や海洋物理学の観点よりも、それを利用する立場で説明する。したがって、数式もやや多用しているが、原理・現象論ではなく、利用する際の表示法であるので、理解が必要である。

#### 2.1 エネルギーポテンシャルの評価法

本節では、エネルギーポテンシャル（energy potential）の評価手法を概説する。なお、我が国における海洋エネルギーポテンシャルについては海洋開発産業概論（第1版）に記述がある他、詳しくは以下の報告書で俯瞰されている。ウェブサイトから閲覧・ダウンロードが可能なので、適宜参照のこと。

- ・経済産業省資源エネルギー庁：平成22年度新エネルギー等導入促進基礎調査事業（風力エネルギーの導入可能量に関する調査）、2011.
- ・国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）：海洋エネルギーポテンシャルの把握に係る業務報告書、2011.  
（対象は波力、海洋温度差、海流、潮流、潮汐の5種類）
- ・環境省：再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査、2011.  
（海洋エネルギーでは風力のみが対象）

##### 2.1.1 風と流れ

###### (1) 風と流れのエネルギー

風と流れのエネルギーは、ともに流体の運動エネルギーである。圧縮性の有無や密度の違い（水は空気の約800倍）はあるが原理は同じであり、エネルギーを取り出すデバイスも類似点が多いため、以下では主に風力発電を念頭に置いて説明する。

空気密度を $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>]、風速を $U$  [m/s]とすると、風の単位体積当たりの運動エネルギー $K$  [J/m<sup>3</sup>]は、次式で表される。

$$K = \frac{1}{2} \rho U^2 \quad (2.1.1)$$

空気の密度は湿度、気圧、気温で変化する。乾燥した空気の1気圧（1013hPa）、15°Cでの密度は1.225kg/m<sup>3</sup>である。

風車は、その受風面積 $A$  [m<sup>2</sup>]を通過する風のエネルギーを利用する。よく見かける水平軸型の風車（図2.1.1）では、ロータが通過する円の面積がこれに当たる。また、取り出せるエネルギー（パワー：仕事率）は、単位時間に通過する風の体積 $AU$ に比例する。したがって、パワー $P$  [W]は次式のようなになる。

$$P = K \cdot AU = \frac{1}{2} \rho AU^3 \quad (2.1.2)$$

すなわち、風のエネルギーは風速の2乗に、パワーは風速の3乗に比例するため、風の強い海域に風力発電施設を設置することが非常に重要である。



図 2.1.1 浮体式洋上風力発電施設「はえんかぜ」  
(提供：海上技術安全研究所)

ある場所の風のエネルギーポテンシャルを評価する場合には、まず目安として平均風速を用いるが、同じ平均風速であっても、発電に適した風が多く吹くことが重要である。極端な場合、発電できないような微風と強風が多くを占めることも考えられるが、実際には図 2.1.2 のような滑らかな分布（発現頻度）となる。したがって、より詳しいエネルギーポテンシャルを計算するためには、風速階級（wind scale）毎のエネルギーを求めて合計する必要がある。

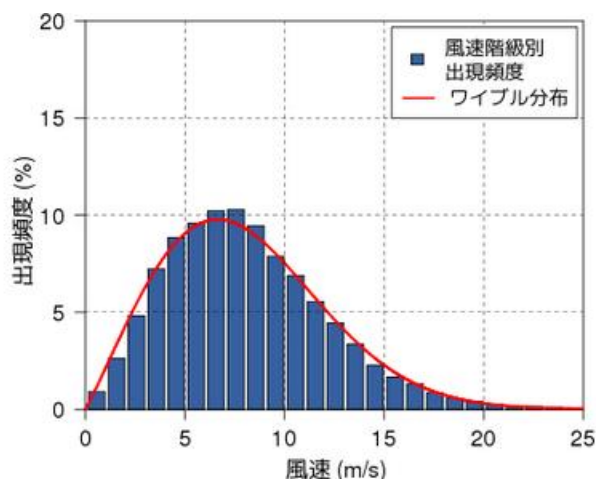


図 2.1.2 NEDO NeoWins（洋上風況マップ）  
(出典：NEDO NeoWins（洋上風況マップ）ウェブサイト)

風速の観測値には統計的なばらつきがあるため、図 2.1.2 の赤線のような適当な分布曲線に当てはめることが行われる。分布曲線としては、式 (2.1.3) に示すレイリー分布

## 第2章 海洋の風・波・流れ

(Rayleigh distribution) や式 (2.1.4) のワイブル分布 (Weibull distribution) が多く使われる。レイリー分布は、波高や船舶・海洋構造物の応答の分布を記述する場合などに用いられている。また、ワイブル分布は、物体の強度や寿命を統計的に記述するために考案されたものであるが、応用範囲が広いと他分野にも利用されている。

$$f(x) = \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2.1.3)$$

$$f(x) = \frac{m}{\eta} \left(\frac{x}{\eta}\right)^{m-1} \exp\left\{-\left(\frac{x}{\eta}\right)^m\right\} \quad (2.1.4)$$

このような確率分布のパラメータ (ここでは  $\sigma, m, \eta$ ) は母数と呼ばれる。

発電施設設置プロジェクトの計画初期段階では、母数が一つで平均風速だけで発現頻度を決定できるレイリー分布がよく利用される。レイリー分布の平均値は  $\sigma\sqrt{\pi/2}$  に等しい。ワイブル分布は二つの母数 ( $m$  : ワイブル係数 (形状パラメータ)、 $\eta$  : 尺度パラメータ) を持つことから分布を観測値に合わせやすい。

例えば、図 2.1.3 のような平均風速 7m/s の観測値が得られた場合、レイリー分布は出現確率のピークをうまく表現できないが、ワイブル分布では  $m=2.5$ 、 $\eta=7.9$  とすることで、同じ平均値を保ちながら分布形をより近いものにすることができる。

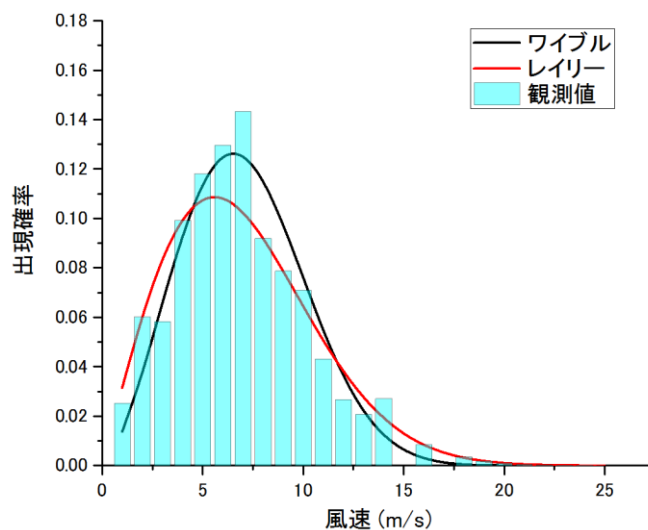


図 2.1.3 平均風速 7m/s の観測値に当てはめた確率分布

なお、潮流・海流では観測値の蓄積が少なく、標準的な分布が存在しないため、現地観測や数値シミュレーション (後出) が必要となる。

以上は、資源量としてのエネルギーポテンシャルについて述べた。一方、発電量の評価は、出力曲線 (パワーカーブ、power curve) で代表される風車の性能を考慮する必要がある。図 2.1.4 の出力曲線は 5MW 風車を想定したもので、カットイン (cut-in) 風速 (約 3m/s) で発電が開始され、定格風速 (約 13m/s) で定格発電量に達し、カットアウト (cut-out) 風速 (25m/s) 以上では運転を停止する。定格風速以上で出力を一定とするのは、発

## 第2章 海洋の風・波・流れ

電機の定格を超えないようにする他、機器や構造の合理化のためである。

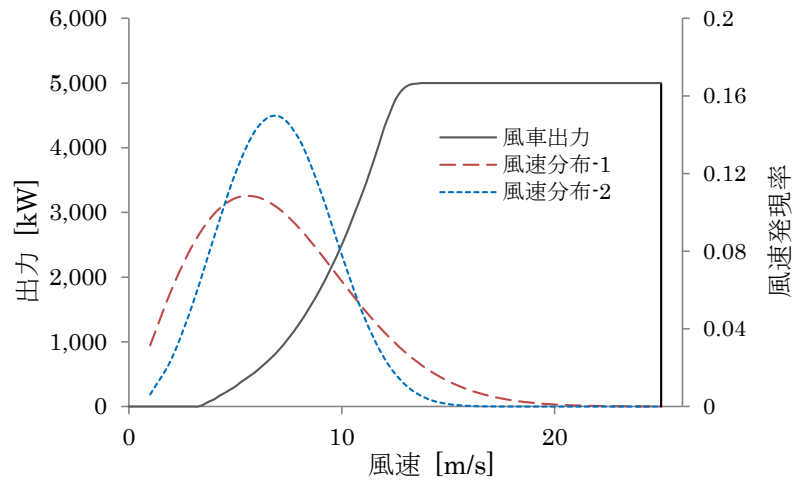


図 2.1.4 出力曲線と風速分布の関係

図 2.1.4 には平均風速 7m/s の 2 種類の風速分布を示している。ビン（風速階級）毎に風速発現率と風車出力を乗じ、全風速で合計したものが年間発電量となる。風速分布-1 はカットイン風速未満の比率が高いため発電しない時間が長い、発電量の大きい高風速域の比率も高いため、結果として風速分布-2 に比べて風速分布-1 の方が発電量は 15%大きくなる。一方、どちらの風速分布でも 20m/s 以上の風は稀なため、カットアウト風速を増加させる設計をしても発電量はほとんど増加しない。このように、設置海域の風速分布に合った風車を選定することが重要である。

なお、このような施設に用いられる二つの用語について触れておく。よく使われる稼働率（availability factor）は、利用可能率とも言われ、設備が正常に稼働できる状態の時間割合であり、実際の発電量とは関係がない。実績として風車の稼働率は 95%程度である。稼働率は風車の信頼性・整備性、ならびに保守の体制に強く依存する。一方、風車は風が吹かなければ発電しないため、経済性評価のために設備利用率（capacity factor）が用いられる。これは、定格運転を続けた場合に比べて、実際の発電量が何%に当たるかを表す数値であり、一般には式 (2.1.5) によって年間の設備利用率が用いられるが、月別や季節別の値が利用されることもある。また、うるう年では 366 日になることは言うまでもない。

$$\text{設備利用率 [\%]} = \frac{\text{年間発電電力量 [kWh]}}{\text{定格出力 [kw]} \times 24[\text{時間}] \times 365[\text{日}]} \quad (2.1.5)$$

例えば、原子力発電は優先的に使用するため設備利用率は 80%以上とされる。これに対して、陸上風力は 22%、太陽光は 13%程度と一般にいわれるが、これは風速や日照により上下する。洋上風力発電では一般に 30%以上、風況が良い海域では 40%程度といわれており、陸上風車に比べて高いコストに見合う発電量を得ることができるかが成立性の鍵となる。



(2) 風況の求め方

風車に影響を与える風の要素には、風速、風向、乱流（風の空間的・時間的な乱れ）等があるが、ここでは主にポテンシャル評価の観点から、風速について説明する。

地表付近の風は、高低気圧、台風、前線、海陸風、雷雨などの気象現象が原因となって、様々な時間・空間スケールで変動している。この変動を様々な周期成分の波の重なりとして解析し、各成分波のエネルギースペクトル (energy spectrum) で表現したものが図 2.1.5 である。

図のように大きく三つのピークがあり、約4日周期は高低気圧や台風など、約半日周期は海陸風や山谷風などの日変化、約1分周期は大気境界層内の地形や植生による乱れや熱対流サーマルによるものである。図は地上での観測値であり、洋上では1日より短い周期の変動は小さくなる。一方、ここには示されていないが、日本付近はモンスーン気候であるから、季節風の影響で年周期の変動も大きい。当然ながら年によっても変化するため、長期間の風速変動を評価する必要がある。

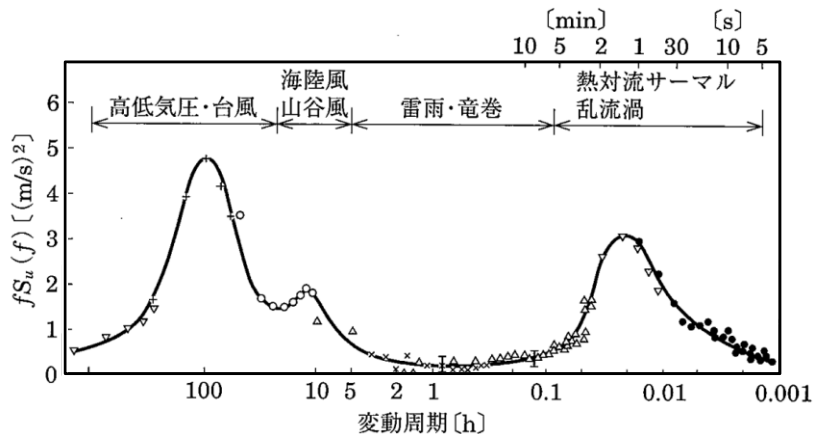


図 2.1.5 風速の変動スペクトル  
(出典：牛山泉、2005)

一方、風速は鉛直方向にも変化し、上空の方が速くなる。一般に、式 (2.1.6) のようなべき乗則 (power law) を用いることが多い。ここで、 $z$  [m]は対象とする高度、 $z_0$ は観測値が得られている高度、 $U$  [m/s]は風速である。指数  $n$  は周辺の地形によって変化するが、平坦な陸上や洋上では台風のような強風時を除き、7程度を使う場合が多い。したがって、風車が設置される高さも考慮する必要がある。

$$U(z) = U(z_0) \left( z / z_0 \right)^{1/n}, \quad z_0 = 10\text{m} \quad (2.1.5)$$

風車のロータが位置する高度は高く、世界最大級の風車のブレード (blade) が達する高さは海面上 200m を超える。このような高度における長期の観測値は一般に存在しない。後述するような方法によって観測することは可能であるが、コスト等から必ずしも容易ではないため、海上風の予測について様々な研究が行われている。

## 第2章 海洋の風・波・流れ

### ① 気象官署の観測データに基づく方法

風況観測データは基本的には陸域のものであるので、それを入力データとして風況シミュレーションによって候補海域の海上風を予測する。風況の予測精度が以下に示す平均風速の比、変動風速の比、相関係数の比等の統計量の範囲を満たせば、予測値は妥当と判断される。

$$\text{平均風速の比：} \quad 0.85 < U_y / U_x < 1.15 \quad (2.1.6)$$

$$\text{変動係数の比：} \quad 0.85 < (\sigma_y / U_y) / (\sigma_x / U_x) < 1.15 \quad (2.1.7)$$

$$\text{相関係数の比：} \quad \rho_{xy} = \frac{\sum u_{xi} u_{yi}}{\sigma_x \sigma_y} > 0.8 \quad (2.1.8)$$

ここで、

$U_x, U_y$  : 当該地点の風況観測およびシミュレーションによる評価期間内の平均風速  
(それぞれ  $x, y$  方向)

$\sigma_x, \sigma_y$  : 風況観測およびシミュレーションの観測期間内標準偏差  
(それぞれ  $x, y$  方向)

$u_{xi}, u_{yi}$  : 風況観測およびシミュレーションによる 10 分、あるいは 1 時間平均風速  
(それぞれ  $x, y$  方向)

### ② 気象シミュレーションに基づく方法

風況観測データを用いる場合には、最低でも 1 年間のデータが必要であるが、そのデータがない場合には観測が必要である。気象シミュレーションに基づく方法は、風況観測データによらない手法である。気象シミュレーションに基づく風況予測の流れを図 2.1.6 に示す。

一般的には、まず、全球モデルの客観解析値を初期・境界条件として、メソスケール (mesoscale、およそ 2~2,000km のメッシュサイズ) 気象モデルを用いて 1 年間の気象シミュレーションを行う (図 2.1.7、図 2.1.8 参照)。その結果から水平距離 1km 程度の解像度を有する 1 年分 10 分毎の平均風速の時系列データを得る。このデータを基に統計処理を行って、海上風の風速の風向別発現頻度、風速階級別発現頻度を求める。

次いで、マイクロスケール (microscale) 工学モデルにより水平解像度 1~2km 程度以下の微細地形等の影響を取り入れて、候補海域における地域海上風を実際の風況に合致した局所海上風に変換・予測する。予測結果は、近傍の気象官署等のデータと比較・検証することとし、前述の通りの判断基準に基づいて風況予測の精度を検証する。

## 第2章 海洋の風・波・流れ

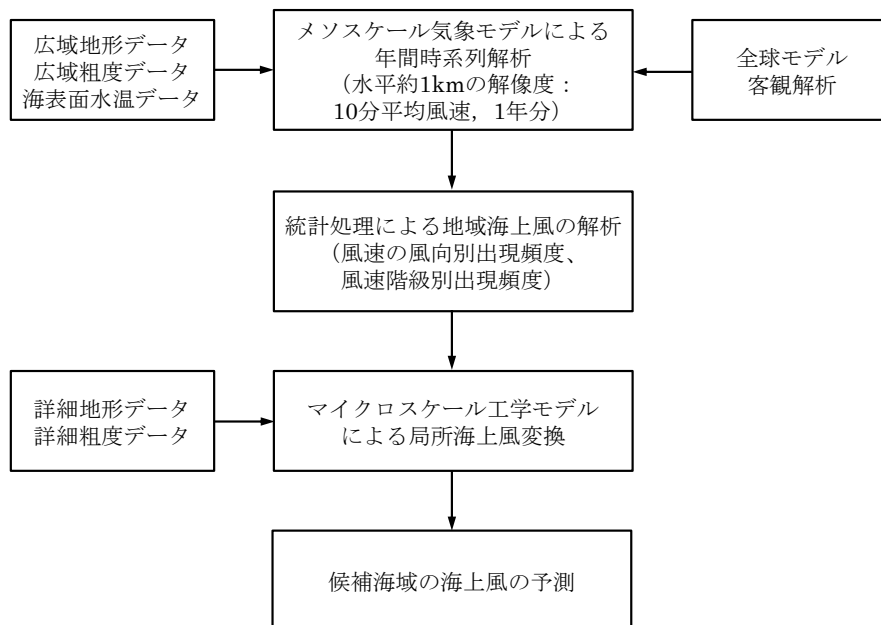


図 2.1.6 気象シミュレーションに基づく風況予測の流れ  
(出典：NEDO、2015 による図を参考に作成)

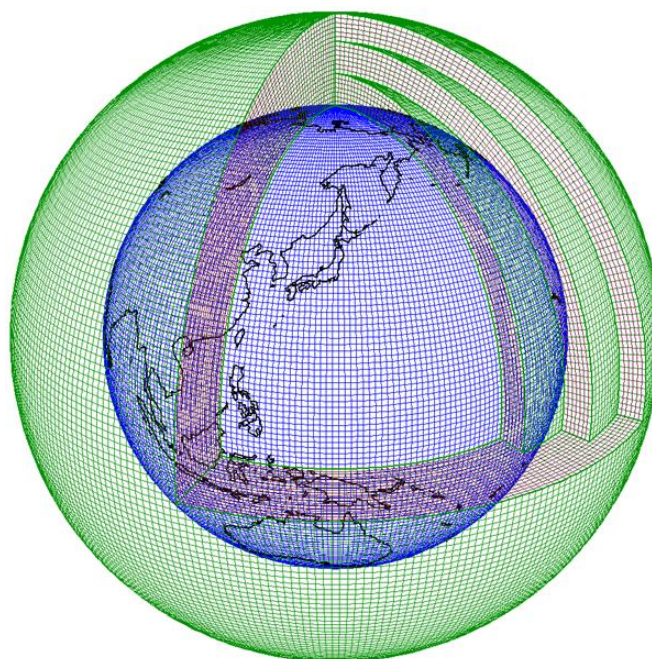


図 2.1.7 気象シミュレーション全球モデルの格子例  
(出典：国土交通省気象庁ウェブサイト)

## 第2章 海洋の風・波・流れ

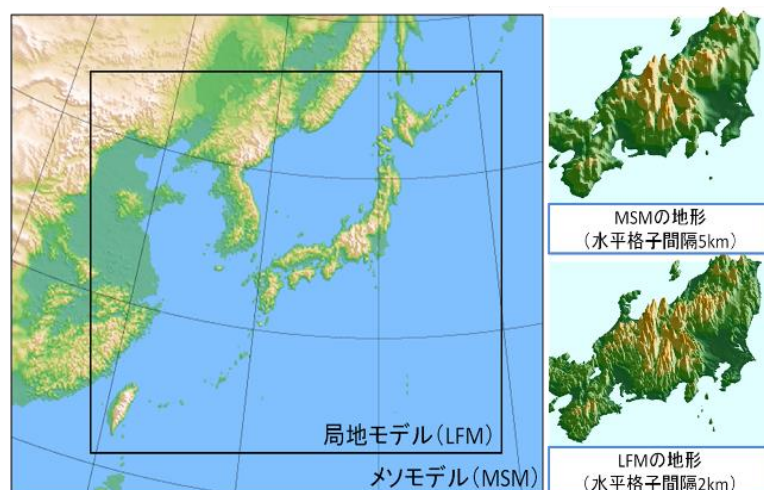


図 2.1.8 気象シミュレーションメソモデルの例  
(出典：国土交通省気象庁ウェブサイト)

### ③ 既存データの利用

初期検討に利用しやすいように整理された既存のデータ（基本的に計算値）も存在する。

NEDO の局所風況マップでは、図 2.1.9 のように高度 30m、50m、70m における年平均風速の水平分布や風配図（方向別の分布図）、風速毎の発現頻度を現すワイブル分布係数が得られ、データのダウンロードも可能である。

また最近では、高度 140m までをカバーするとともに、水深、海底地質等の環境情報、港湾区域、航路等の社会環境情報など、洋上風力発電の計画に必要な情報を一元化した「洋上風況マップ」が公開されている（図 2.1.10）。

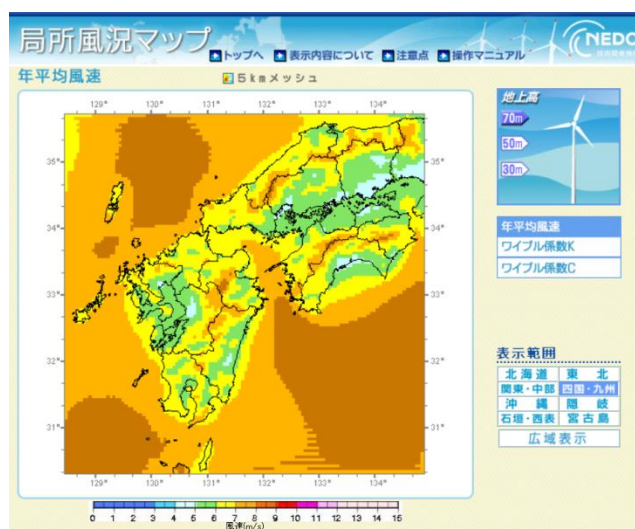


図 2.1.9 NEDO 局所風況マップ  
(出典：NEDO 局所風況マップウェブサイト)

## 第2章 海洋の風・波・流れ

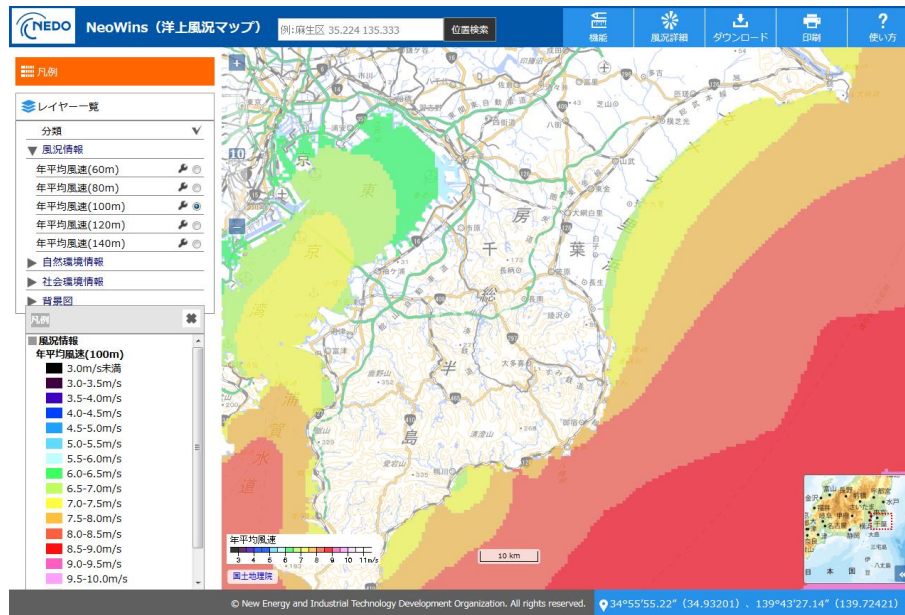


図 2.1.10 NEDO NeoWins (洋上風況マップ)  
(出典：NEDO NeoWins (洋上風況マップ) ウェブサイト)

データベースとしては、例えば国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所海上技術研究所の「日本近海の波と風のデータベース」がある。その詳細版は、空間分解能が緯度経度 0.5deg (約 50km) と粗いものの、風速、風向、波高、波向、波周期の 5 要素を任意に組み合わせた発現頻度表をエクセル形式で出力することができ、気象海象の概要を把握するのに便利である。ただし、風速・風向は海面上 10m の値のため、高高度の風速の推定にはべき乗則、例えば式 (2.1.6) 等を用いる必要がある。

### (3) 流況の求め方

流れには、海流、潮流の他、風による吹送流 (wind current) などがある。これらのうち、エネルギー資源と考えられるのは海流と潮流である。海流は地球規模の風の循環により表層水が駆動される大規模流であり、陸から比較的離れているが、流量が大きく流速の変動が少ないという利点がある。潮流は天体の引力により海水が流動する周期的な現象であり、地形影響を強く受けるため地域性が強いが、流速を予測できることが利点である。その他、吹送流や津波の流れなどは、浮体施設に働く外力として安全性の点から考慮する必要がある。

観測の困難さから潮流・海流に対する観測値や知識の蓄積は、風に比較して非常に少な

## 第2章 海洋の風・波・流れ

いのが実態である。したがって、潮流・海流発電では、現地観測を行うことが原則となる。

海流発電が行われる海域やウィンドファームが設置されるような沖合では、海流と吹送流が主要素と考えられる。流れの状況は、前に述べた海洋台帳の他、日本海洋データセンター（JODC: Japan Oceanographic Data Center）のウェブサイト、JODCのオンラインデータ提供システム（J-DOSS）（図 2.1.11）、国立研究開発法人水産研究・教育機構による新海況予測システム（FRA-ROMS: Fisheries Research Agency - Regional Ocean Modeling System）（図 2.1.12）、JADE2（Japan sea Data assimilation Experiment、日本海中心）から入手可能である。

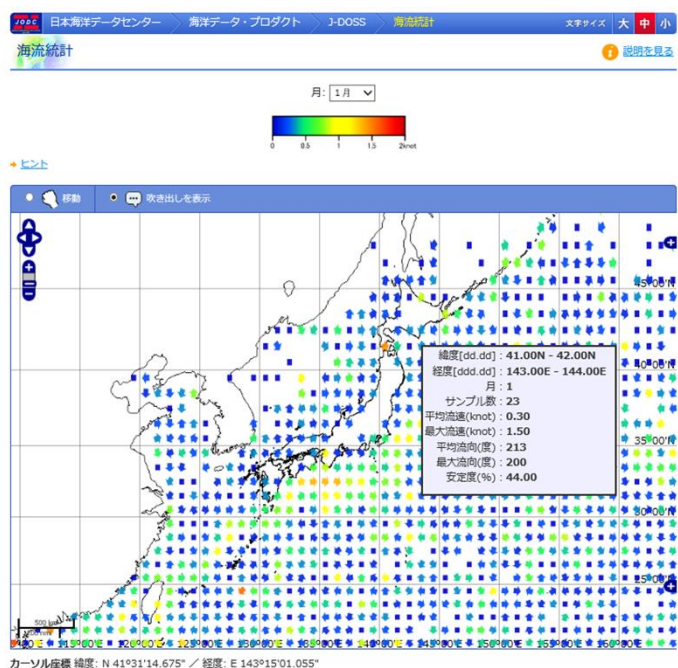


図 2.1.11 海流の統計値  
(出典: 日本海洋データセンターウェブサイト)

## 第2章 海洋の風・波・流れ

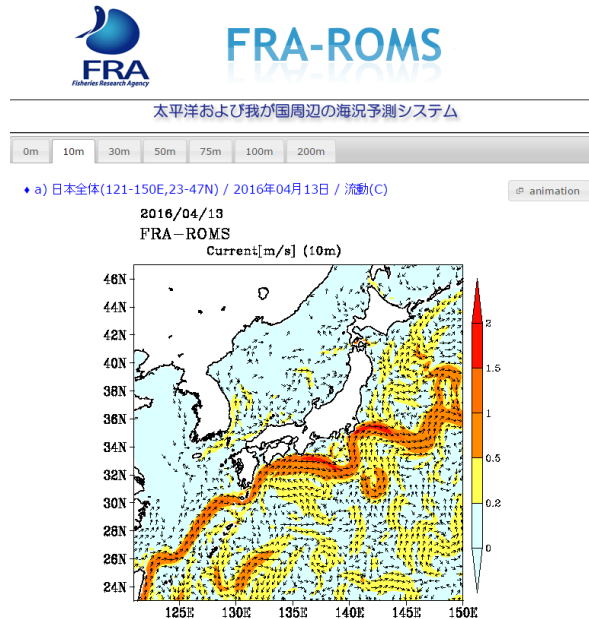


図 2.1.12 海流の推定値

(出典：水産研究・教育機構 FRA-ROMS ウェブサイト)

なお、海流では、数年に及ぶ蛇行が発生する場合があります。蛇行による流れの変化を把握するには、かなり長期間の計測が必要となるため、衛星観測データやシミュレーションも利用する必要があります。

黒潮について、以下に気象庁ウェブサイトの説明を引用する（一部改変）。

黒潮には、大きく分けて2種類の安定した流路のパターンがある。一つは本州南方の東経 136deg~140deg で北緯 32deg 以南まで大きく蛇行して流れる「大蛇行流路」、一つは四国・本州南岸にほぼ沿って流れる「非大蛇行流路」である。「非大蛇行流路」は、遠州灘から関東近海で小さく蛇行する「非大蛇行離岸流路」と、四国・本州の南岸近くを直進する「非大蛇行接岸流路」に代表される。黒潮が大蛇行流路となって流れている状態を、黒潮大蛇行と呼ぶ。(中略) 黒潮がいったん大蛇行流路となると、多くの場合1年以上持続する。1967年以降、2017年までに黒潮大蛇行は6回発生している(図 2.1.13)。

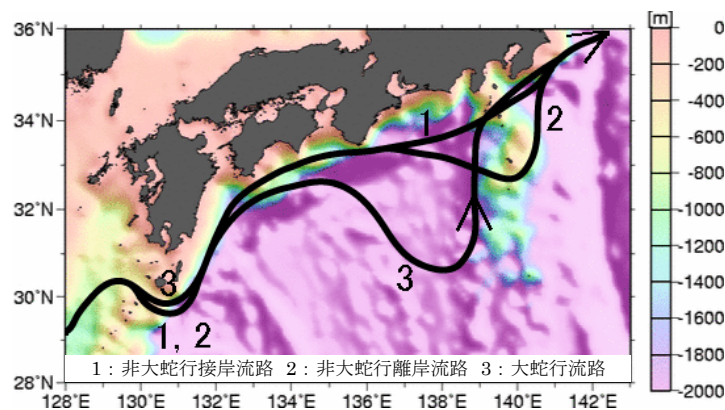


図 2.1.13 黒潮の典型的な流路

(出典：気象庁ウェブサイトの図を一部改変)

## 第2章 海洋の風・波・流れ

設計に必要な詳細データは、衛星データ等と同化処理を行ったシミュレーション結果である JCOPE2 や JCOPE-T を参考にすることができる (JCOPE : Japan Coastal Ocean Predictability Experiment、<http://www.forecastocean.com/j/research.html>)。

JCOPE2 と JCOPE-T は鉛直方向に海底までのデータを持っているため、スパー (spar) 型風力発電施設のような喫水の大きい浮体や水中浮遊式海流発電施設にも適用可能である。JCOPE2 は日平均の流向・流速であり、また風による吹送流等は含まれない海流データであるが、1993 年以降の長期データを利用できる。一方、JCOPE-T は 2011 年以降のデータであるが、1 時間間隔の瞬時値であり、また海流以外の成分も含んでいるため精度が高い。したがって、この両者を組み合わせることが望ましい。

具体的には、同一格子点・同一位置における両データの相関を求め、JCOPE2 の長期データに補正係数を乗じて平均流速・流向やその鉛直分布を求める。

ただし、潮流・海流発電では、発電性能を精度良く評価できる詳細な情報が必要である。陸に近い海域では局所的な流れの影響があるため、ある程度の期間にわたり現地観測を行うことが必要と考えられる。

### 2.1.2 波浪

#### (1) 波のエネルギー

海洋の表面の波は、風のエネルギーによって発生する。一度波が発生すると、重力によって元に戻ろうとする運動が起き、この運動が波動となって周囲に伝播していく。

図 2.1.14 のような波を考える。波は振幅  $h$  [m] (波高  $H$  の 1/2) を持ち、 $x$  軸の正の方向に伝播する場合、平均海面からの水面の変位  $\eta$  [m] は次式で表される。

$$\eta = h \sin(kx - \omega t) \quad (2.1.9)$$

ここで、 $k$  [ $\text{m}^{-1}$ ] は波数、 $\omega$  [ $\text{s}^{-1}$ ] は角周波数、 $t$  [s] は経過時間で、波長  $L$  [m]、周期  $T$  [s] と以下の関係にある。

$$k = \frac{2\pi}{L}, \quad \omega = \frac{2\pi}{T} \quad (2.1.10)$$



## 第2章 海洋の風・波・流れ

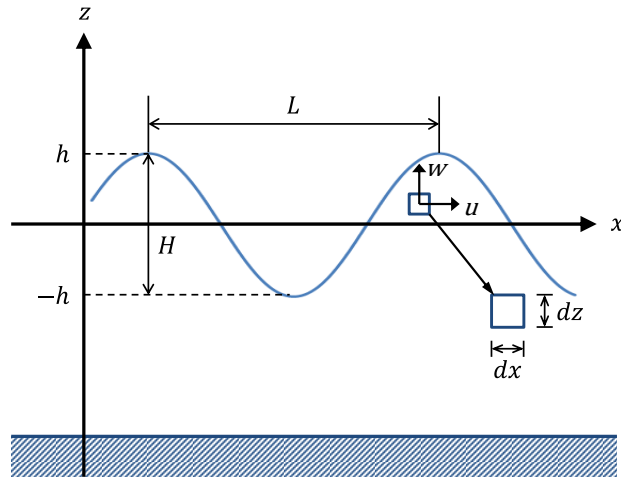


図 2.1.14 波の記号の定義

波のエネルギーは、平均海面からの水面の変位による位置エネルギーと、波粒子の動きによる運動エネルギーの和である。

位置  $(x, z)$  [m]にある流体の微小部分  $dx dz$  が重力場において持つ位置エネルギーは、流体の密度を  $\rho_w$  [kg/m<sup>3</sup>]、重力加速度を  $g$  [m/s<sup>2</sup>]とすれば  $\rho_w g z dx dz$  であり、これを  $z$  方向に積分すると以下になる。

$$\int_0^{\eta} \rho_w g z dx dz = \frac{1}{2} \rho_w g \eta^2 dx \quad (2.1.11)$$

したがって、水面の単位面積 ( $x$  軸方向および紙面に垂直方向) に含まれる位置エネルギー  $E_p$  [J/m<sup>2</sup>] は、波長  $L$  にわたって平均した結果、次式のようにになる。

$$\begin{aligned} E_p &= \frac{1}{2L} \rho_w g \int_0^L \eta^2 dx \\ &= \frac{1}{2L} \rho_w g h^2 \int_0^{2\pi/k} \sin^2(kx - \omega t) dk \\ &= \frac{1}{4} \rho_w g h^2 = \frac{1}{16} \rho_w g H^2 \end{aligned} \quad (2.1.12)$$

一方、微小部分に作用する運動エネルギーは、 $x$  方向、 $z$  方向の波粒子速度をそれぞれ  $u$ 、 $w$  とすれば  $(1/2)\rho_w(u^2 + w^2) dx dz$  である。単位面積 (および水深方向全て) に含まれるエネルギー  $E_k$  [J/m<sup>2</sup>] は、これを深さ方向に積分するとともに 1 波長について平均して、

$$E_k = \frac{1}{L} \int_0^L dx \int_{-d}^{\eta} \frac{1}{2} \rho_w (u^2 + w^2) dz \quad (2.1.13)$$

上式に  $u$ 、 $w$  の式 (2.1.15) を代入し、簡単のため積分の上限を  $\eta$  ではなく 0 とすると式 (2.1.16) のように変形でき、式 (2.1.13) との比較から、位置エネルギーと運動エネルギーは等しいことが分かる。

$$u = h\omega \frac{\cosh k(z+d)}{\sinh kd} \sin(kx - \omega t)$$

$$w = h\omega \frac{\sinh k(z+d)}{\sinh kd} \cos(kx - \omega t) \quad (2.1.14)$$

$$E_k = \frac{\rho_w h^2 \omega^2 \sinh 2kd}{8k(\sinh kd)^2} = \frac{1}{4} \rho_w g h^2 = \frac{1}{16} \rho_w g H^2 \quad (2.1.15)$$

最終的に波のエネルギーは、次式で表される。

$$E = E_p + E_k = \frac{1}{2} \rho_w g h^2 = \frac{1}{8} \rho_w g H^2 \quad (2.1.16)$$

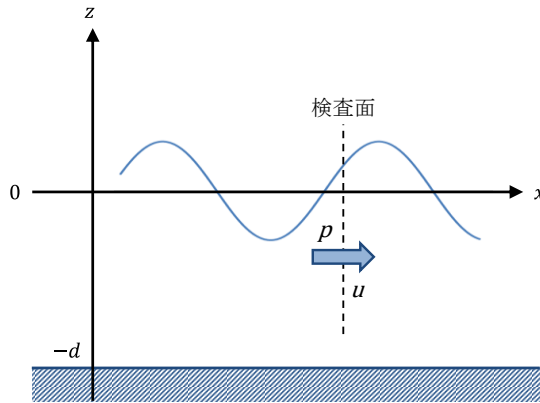


図 2.1.15 検査面の圧力と水平流速

波の単位幅（紙面に垂直方向）当たりのパワー  $P$  [W/m] は、検査面の圧力  $p$  [N/m<sup>2</sup>] と水平流速  $u$  [m/s] の積を深さ方向に積分して得られる。したがって、 $C$  [m/s] を波の位相速度、 $C_g$  [m/s] を群速度とすると式 (2.1.18) のようになるので、波エネルギーが伝わる速度は、我々が目にする位相速度ではなく群速度に等しいことがわかる。

$$P = \int_{-d}^{\eta} p \cdot u dz = \frac{\rho_w g}{8} H^2 \cdot \frac{C}{2} \cdot \left[ 1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right] = C_g E \quad (2.1.17)$$

ただし、静水中の圧力  $p$  は、次式で与えられる。

$$p = \rho_w g \cdot \frac{H}{2} \cdot \frac{\cosh k(z+d)}{\cosh kd} \sin(kx - \omega t) \quad (2.1.18)$$

以上の式はやや複雑であるが、深海波 ( $d/L \geq 1/2$  が目安) を想定すると簡略化できる。すなわち  $C_g$  は、深海波の位相速度  $C_0$ 、周波数  $f (= 1/T = \omega/2\pi)$  を用いて以下になる。

$$C_g = \frac{1}{2} C_0 = \frac{gT}{4\pi} = \frac{gf^{-1}}{4\pi} \quad (2.1.19)$$

よって、規則的な深海波のパワーは、次式となる。

第2章 海洋の風・波・流れ

$$P = \frac{1}{32\pi} \rho_w g^2 H^2 T \tag{2.1.20}$$

このように、波のエネルギーは波高の2乗に、パワーは波高の2乗と波周期の積に比例する。既に述べた風力や潮流・海流力のパワーは流速だけの関数であったが、波力のパワーは二つの変数に関わることに注意する必要がある。

以上は規則波の評価法であるが、実際の海面は不規則波であり、様々な周波数（周期、波長）の規則波が重なっている。一般に「波高○m、周期×秒」と表現されるのは、有義波高（significant wave height）、有義波周期（significant wave period）と呼ばれる代表量である。有義波高と有義波周期から不規則波のエネルギーとパワーを求める方法は、本章末の参考-1に記述する。

ある海域のパワーを評価するためには、表 2.1.1 のような波浪発現頻度表を用意して、セル毎のパワーを求めて合計する必要がある。表において、行は有義波高の階級、列は有義波周期の階級である。エネルギーは波高だけで決まるため、波高の発現頻度（各行の合計）だけを用いれば良い。具体的な発電施設の年間発電量を評価する場合には、パワーカーブと波浪発現頻度表を組み合わせる。その方法は、風力発電で示した方法と同様である。

なお、表では左上が空白になっているが、この領域では波周期が短く（波長が短く）、波高が高いため、波頂が崩れて波高が減じ、また周期の長い波にエネルギーが移行するため、この条件の波が存在しないからである。また、周期の長い領域を中心に部分的な空白が見られるのは、有限なデータを統計処理した結果、そのセルに当てはまる海象が発生しなかったためである。

表 2.1.1 有義波高一有義波周期発現頻度表の例

WAVE HEIGHT [m]	WAVE PERIOD [s]															
	0-	1-	2-	3-	4-	5-	6-	7-	8-	9-	10-	11-	12-	13-	14-	
14.75-																
14.25-																
13.75-																
13.25-																
12.75-																
12.25-																
11.75-																
11.25-																
10.75-																
10.25-																
9.75-														12	53	82
9.25-														15	6	26
8.75-													5	18	6	
8.25-												5	29	25	6	
7.75-												28	63	61		
7.25-												57	68	53		
6.75-												80	89	2		
6.25-									1	6	73	254	244	20		
5.75-										9	190	362	225	58		
5.25-										38	358	345	86	60	4	4
4.75-								1	6	239	537	409	99	112	69	60
4.25-				4	101	49	8	62	457	732	151	83	22	62	92	
3.75-				3	24			43	504	1,205	940	215	51	18	99	39
3.25-				4	5	37	395	1,978	3,509	867	215	65	39	66	4	4
2.75-				6		558	4,269	8,833	3,452	1,052	268	167	150	70	216	
2.25-				7	71	4,807	16,891	19,377	4,078	1,201	632	564	188	125	382	
1.75-				19	3,698	37,624	59,757	16,406	4,904	2,226	1,427	1,488	682	130	466	
1.25-			2	393	67,153	124,788	48,125	22,365	8,056	4,847	2,330	1,640	631	447	448	
0.75-				93	105,178	184,301	85,473	65,959	32,524	15,232	6,565	3,925	2,804	1,593	394	396
0.25-		37	48,325	211,529	53,911	53,930	58,081	40,470	11,167	4,556	2,124	797	286	33	194	
0-		1,143	14,132	3,970	3,153	4,255	3,635	1,915	576	245	36	11	9	2		

(出典：海上・港湾・航空技術研究所海上技術安全研究所ウェブサイトによる表を一部改変)

## 第2章 海洋の風・波・流れ

### (2) 波浪の求め方

浮体構造物では、揺れの大きさが波周期によって大きく変化するため、発電性能以外の点でも波周期は重要となる。さらに、係留設計等の詳しい検討を行うためには波向も重要になるため、波高、波周期、波向の3相関が必要になる。

後の2.3.2項で説明するような方法によって外洋の波浪を観測することは可能であるが、コスト等の観点から必ずしも容易ではないため、波浪推算結果を用いることが多い。波浪の発達は、水面付近の風速、吹送距離(fetch)および吹送時間(duration)によって決まる。沖合の波が沿岸近くの浅水域に達すると、波周期は一定に保たれるが、その他ほとんど全ての特性は変化する。波浪推算はこれらの情報から波浪を計算する方法である。遠方から来襲する必要性からうねりを考慮するため、広範囲の計算を行う必要がある。ここでは、波浪推算の基礎式であるエネルギー平衡方程式を示すに留める。

$$\frac{DF(k)}{Dt} \equiv \frac{\partial F}{\partial t} + \dot{x} \frac{\partial F}{\partial x} + \dot{k} \frac{\partial F}{\partial k} = S_{net} \quad (2.1.21)$$

$$S_{net} = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} \quad (2.1.22)$$

ここで、 $F$ はエネルギー、 $k$ は波数ベクトル、 $t$ は時間、 $x$ は空間座標である。

式(2.1.22)の第1項は波浪エネルギーの局所的な時間変化を現し、第2項は空間座標における移流効果によるエネルギー変化を表し、第3項は波浪の屈折によるエネルギー変化を表す。 $S_{net}$ はエネルギーソース関数と呼ばれるもので、 $S_{in}$ は風から波へのエネルギー輸送を、 $S_{nl}$ は波数の異なる四つの成分波の間の非線形相互作用を、 $S_{ds}$ は砕波や内部粘性等によるエネルギーの消散をそれぞれ表す。

適切な初期条件と境界条件を与えて式(2.1.22)を積分することで、波浪エネルギースペクトルを求めることができるが、内在する物理機構が完全に解明されたわけではなく、モデルや数値計算法の改良が続けられている。

前に述べた国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所海上技術安全研究所の「日本近海の波と風のデータベース」(詳細版)は、公益社団法人日本気象協会による波浪推算結果を統計処理したものである。特に波浪では波高一波周期一波向の3相関発現頻度表を出力できるため便利である。

観測データでは、ナウファス(全国港湾海洋波浪情報網、NOWPHAS: Nationwide Ocean Wave information network for Ports and HarbourS)が利用可能である。ナウファスは、国土交通省港湾局・各地方整備局・国土技術政策総合研究所および国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所港湾空港技術研究所等により構築・運営されている沿岸の波浪情報網で、78観測地点において波浪の定常観測を実施している。

図2.1.16の黒丸で観測されているのは沿岸波浪であり、地形影響を受けている。一方、データ期間が短い、近年ではGPS波浪計(図2.1.17)により沖合の観測も実施されている。

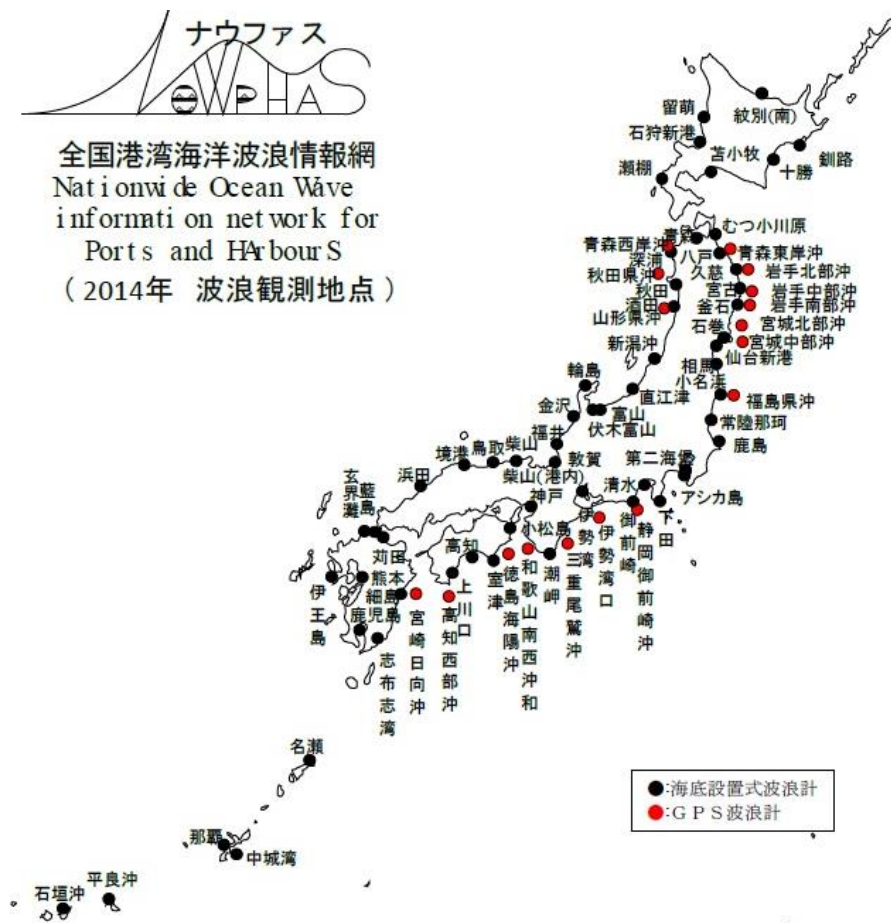


図 2.1.16 ナウファス設置地点  
 (出典：ナウファスウェブサイト)



図 2.1.17 GPS 波浪計  
 (出典：国土交通省ウェブサイト)

## 2.2 設計条件の設定法

本節では、風、波、潮流・海流を対象として、安全性を検討するための外部条件の設定法を概説する。具体的には、1年再現期待値、50年再現期待値が用いられることが多いため、これらの設定法を示す。なお、再現期待値（expected value in return period）とは、確率的にある一定期間内に生ずると予測される最大値である。

### 2.2.1 風況

#### (1) 極値統計解析による方法

極値統計解析とは、年最大値等の極値データを統計処理する方法である。年最大風速の非超過確率（non-exceedance probability）が、適当な極値分布関数（extreme value distribution function）に従うと仮定し、積率法により最大風速を基準化変数に対応させて、年最大風速の確率分布を求める手法である。

図 2.2.1 に長年の観測データのある気象官署における年最大風速から候補海域における非台風時の 50 年再現風速を求めるフローを示す。設置予定海域と気象官署の距離が大きい場合には、MCP 法（Measure Correlate Predict method）等を用いて両地点の相関係数を求め、気象官署のデータから設置予定海域の値に換算することが行われる。なお、再現期間 1 年の極値風速を求める場合には、日最大風速を用い、同様に極値統計解析を行うことができる。

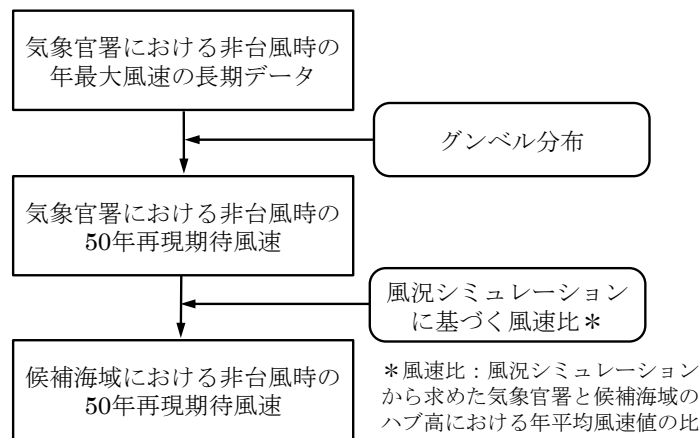


図 2.2.1 グンベルによる 50 年再現風速（非台風時）の算出フロー  
（出典：NEDO、2015 による図を参考に作成）

一般に風速では、極値分布関数として極値 I 型分布（グンベル分布（Gumbel distribution））が用いられる。グンベル分布では極値  $x$ 、極値変数  $z$ 、非超過確率  $F$  および再現期間  $T$  の間に以下の関係がある。

$$F(x) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{x-B}{A}\right)\right]$$

$$z = -\ln[-\ln(1-1/T)] \quad (2.2.1)$$

## 第2章 海洋の風・波・流れ

具体的な極値統計解析の手順は、本章末の参考-2を参照のこと。

### (2) 台風時についての特別な考慮

我が国では台風の襲来によって設計値が決まる海域も多い。そのような海域では、下記の点に留意する必要がある。

- ①我が国は南北に長いため、海域によって台風襲来頻度が異なり、台風襲来が少ない海域では、有意な台風が襲来する年としない年が混在する。その場合、年最大風速が単一の確率モデルで近似できない、すなわち年最大風速を用いた極値統計解析が適用できない可能性がある。
- ②台風周辺部の気圧勾配や台風の移動速度によっては、発生する風の状況が空間的および時間的に変化の激しいものとなる。したがって、最大値を正確に捉えるために分解能の良い評価（数値シミュレーション等）が求められる。

以上の問題点をカバーするため、台風シミュレーション法が開発されている。これは、過去の台風の中心気圧、暴風半径、進路、進行速度等を分布関数に当てはめ、その分布関数を利用して人工的な台風を発生させてモンテカルロシミュレーション（Monte Carlo simulation）を長期間行うものである（石原等、2012）。ただし、我が国は、熱帯低気圧（台風）および温帯低気圧の両方が強風の要因となる混合気候であり、海域によって温帯低気圧が最大風速を与えることがあるため、その両方を考慮した解析を行う必要がある。

### (3) 基準による方法

設置海域の離岸距離が小さい場合には、実績のある手段として、建設省告示第1454号に定める設計基準風速を用いることができる。これは、その地方における過去の台風の記録に基づく風害の程度その他の風の性状に応じて定められたものである。公益社団法人土木学会が地図上に整理したものを図2.2.2に示す。ここでは省略するが、同告示には高度換算の式も示されている。

## 第2章 海洋の風・波・流れ

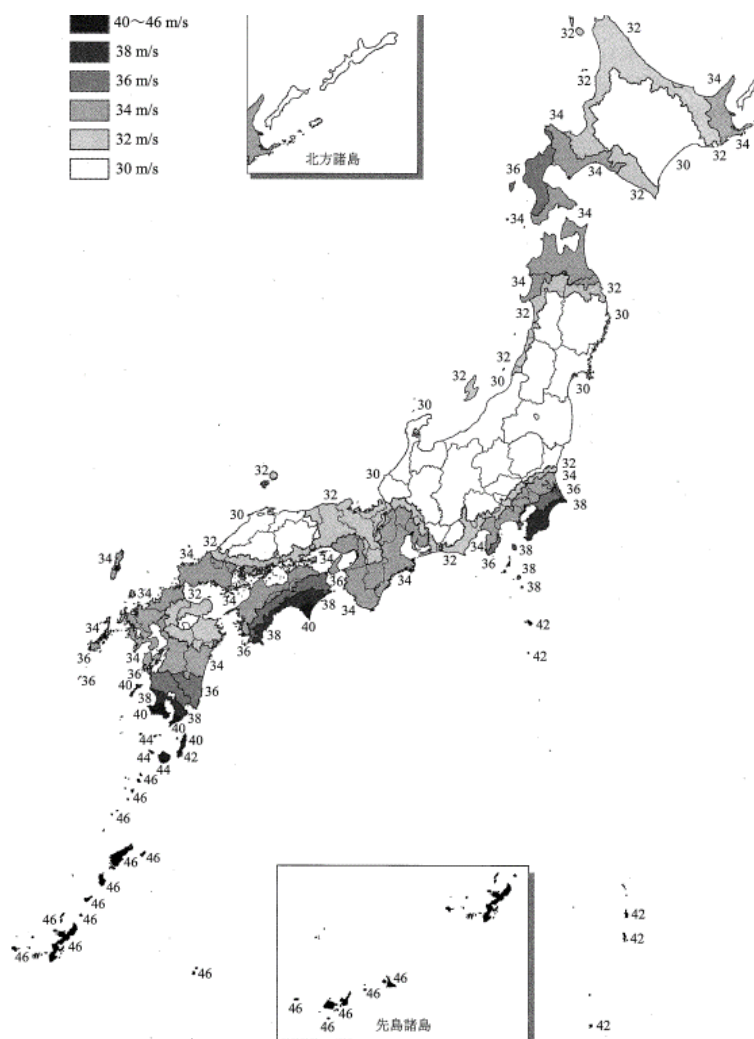


図 2.2.2 日本全国的设计基準風速分布  
(出典：土木学会、2010)

### 2.2.2 波浪

波の 50 年再現期待値は、風速と同じように極値統計解析から求めることができる。空間および時間解像度と信頼性が高い長期間の風データを元にした波浪推算の結果を利用できる。

極値統計解析に用いるのは、年最大値のような期間最大値資料か、例えば波高 6m 以上のように条件を定めた極大値資料である。これら資料に最も適合する極値分布を設定することによって、再現期間 50 年の有義波高を求める。50 年確率波高に対応する有義波周期は波高と周期の散布図より求める。

当てはめ対象の極値分布関数としては、基本的に表 2.2.1 に示す 3 種類に分類できる。各式のパラメータは母数と呼ばれており、グンベル分布は 2 母数、フレシェ分布 (Frechet distribution) 分布とワイブル分布は 3 母数である。なお、2.1.1 項で、風速分布を近似する関数としてワイブル分布を紹介したが、これは表 2.2.1 の式で  $B=0$  としたものである。

母数が多いほど観測値に合わせやすいが、観測値が少し変わっただけで母数の推定値が大きく変わることがあり、安定性に欠ける面がある。極値統計解析の目的は、観測値の背後に



## 第2章 海洋の風・波・流れ

ある母集団を推定することであるから、3 母数型でも安定性に配慮して、例えばフレシェ分布の形状母数は  $k = 2.5, 3.33, 5.0, 10.0$  の 4 種類に、ワイブル分布は  $k = 0.75, 1.0, 1.4, 2.0$  の 4 種類に固定する等、自由度を狭めた上で当てはめが行われる。

具体的な極値統計解析の手順は、本章末の参考・2 を参照のこと。

表 2.2.1 極値分布関数

分布関数	非超過確率	確率密度関数
極値Ⅰ型分布 (ゲンベル分布)	$F(x) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{x-B}{A}\right)\right],$ $-\infty < x < \infty$	$f(x) = \frac{1}{A} \exp\left[-\frac{x-B}{A} - \exp\left(-\frac{x-B}{A}\right)\right]$
極値Ⅱ型分布 (フレシェ分布)	$F(x) = \exp\left[-\left(1 + \frac{x-B}{kA}\right)^{-k}\right],$ $B - kA \leq x < \infty$	$f(x) = \frac{1}{A} \left(1 + \frac{x-B}{kA}\right)^{-(1+k)} \exp\left[-\left(1 + \frac{x-B}{kA}\right)^{-k}\right]$
極値Ⅲ型分布	$F(x) = \exp\left[-\left(\frac{B-x}{A}\right)^k\right],$ $-\infty < x \leq B$	$f(x) = \frac{k}{A} \left(\frac{B-x}{A}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{B-x}{A}\right)^k\right]$
ワイブル分布	$F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x-B}{A}\right)^k\right],$ $B \leq x < \infty$	$f(x) = \frac{k}{A} \left(\frac{x-B}{A}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{x-B}{A}\right)^k\right]$

(出典：合田良實、2008 を参考に作成)

極値統計解析を行うに足る十分な資料がない場合には、既存の推定結果として、例えば国土交通省国土技術政策総合研究所による沖波表（我が国沿岸の波浪外力の分布：付録 C、高田等、2003）があり、全国 127 地点（主に港湾付近）における波高、波周期、波向が表になっている。再現期間は 10 年、30 年、50 年、100 年の 4 種類がある。2003 年以前の波浪推算結果であるが、使用実績が多い。なお、沖波表には地方自治体が作成したものもあり、適宜参照することができる。

### 2.2.3 風と波の関係

2.1.2(2)の「波浪の求め方」で述べたように、海面上を風が吹き続けると、風からのエネルギーを吸収して時間的・空間的に波は発達を続ける。そのため、波高・波周期は風速、吹送距離、吹送時間の関数となる。ただし、波が限界まで発達すると、砕波等によるエネルギーの損失と風からのエネルギー輸送が平衡して波は発達しなくなる（完全発達波）。飽和状態に達した波に対しては次式が成立し、海面上 10m の風速  $U_{10}$  だけの関数となる。

$$\frac{gH_{1/3}}{U_{10}^2} = 0.30 \quad (2.2.2)$$

$$\frac{gT_{1/3}}{2\pi U_{10}} = 1.37 \quad (2.2.3)$$

これらの式は吹送距離、吹送時間、遠方から来襲するうねりの影響を考慮できないが、50年再現期待値のような極値において、風速か波高のどちらかが分かれば他の二つの量を概算できるので便利である。

陸側からの波を評価する場合には、吹送距離  $F$  が限られるため、次式の SMB 法 (Sverdrup, Munk, Bretschneider method) により計算することも可能である。

$$H_{0.30} = \frac{0.30U_{10}^2}{g} \left[ 1 - \left\{ 1 + 0.004 \left( \frac{Fg}{U_{10}^2} \right)^{1/2} \right\}^{-2} \right] \quad (2.2.4)$$

$$T_{0.30} = \frac{1.37 \cdot 2\pi U_{10}}{g} \left[ 1 - \left\{ 1 + 0.008 \left( \frac{Fg}{U_{10}^2} \right)^{1/3} \right\}^{-5} \right] \quad (2.2.5)$$

この他、海洋波の発達に関する研究は古くから行われており、図 2.2.3 にその例を紹介する。この図は、波速  $C$  と波高  $H$  の無次元値を縦軸に、吹送距離の無次元値を横軸にとったもので、図中の記号は右下の凡例にある多くの観測値であり、線は左上に示す 3 種類の提案式である。提案式は観測値とよく一致しており、風速、吹送距離、波高、波速の関係をよく表現していることがわかる。なお、これらの関係は風の吹送時間が十分長く、波が完全発達した状況を表す。

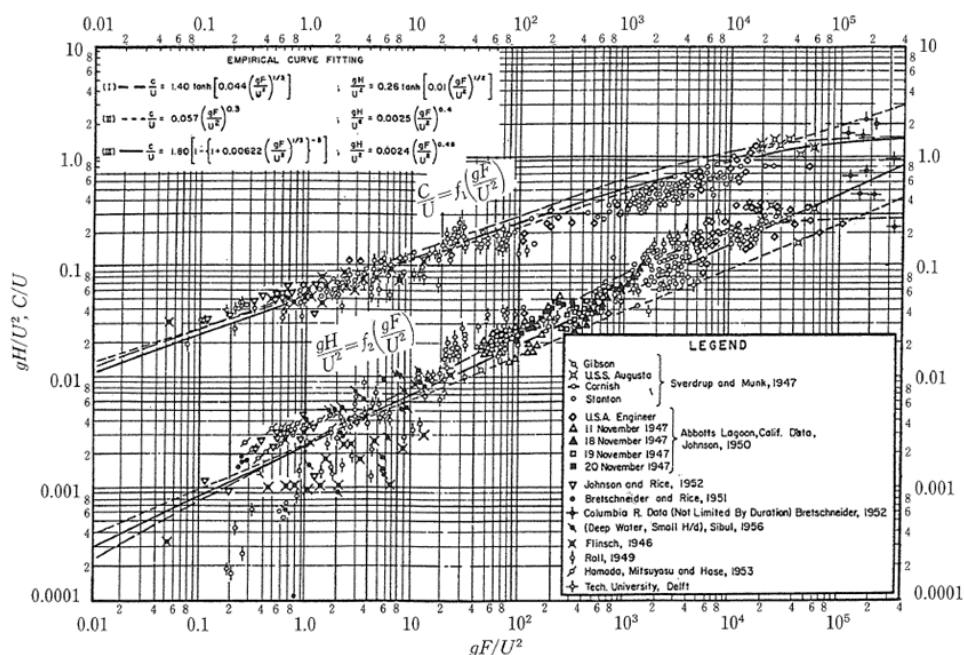


図 2.2.3 有義波高および有義波周期と風速および吹送距離との関係 (出典: Wilson BW., 1965)

## 第2章 海洋の風・波・流れ

なお、波周期  $T$  [s] は波速  $C$  [m/s] から換算する。 $T$  と  $C$  は以下の関係にあるので、波数  $k$  [ $\text{m}^{-1}$ ] と  $T$  の関係を求めれば良い。

$$C = \frac{\omega}{k}, \quad \omega = \frac{2\pi}{T} \quad (2.2.6)$$

水深が深い場合は、 $k$  は角周波数  $\omega$  [ $\text{s}^{-1}$ ] によって陽に表現できるので、 $T$  も陽に表現できる。

$$k = \omega^2 / g \quad (2.2.7)$$

$$C = \frac{gT}{2\pi}, \quad T = \frac{2\pi C}{g} \quad (2.2.8)$$

水深が浅い場合は、これを  $d$  [m] とすると、 $k$  と  $\omega$  の以下の関係式を一度解く必要がある。

$$\omega^2 = gk \tanh kd \quad (2.2.9)$$

また、気象海象パラメータの統計的外挿法によって、平均風速と有義波高との再現期間 50 年の組合せを求めることもできる。逆一次信頼性解析法 (IFORM: Inverse First-Order Reliability Method) を参考-3 に示す。

### 2.2.4 流況

海洋の流れについては、風や波のような観測値の蓄積がないため、設置予定海域における計測を行うことが望ましいが、初期検討に利用できる規格としては、国際電気標準会議 (IEC: International Electrotechnical Commission) の IEC61400-3-1 (Wind turbines – Part 3 Design requirements for offshore wind turbines, Ed 1.0, 2019) や JIS C1400-3 (風車-第3部: 洋上風車の設計要件 (design requirement)、2014) がある。なお、これらの規格の内容は同一である。

これらの規格では、図 2.2.4 に示すように、風による吹送流は海表面から水深 20m まで直線的に減少する分布が仮定される。表層流速は海面上 10m における風速の 10% とされ、流向は風向と一致する。また、水中流 (海流、潮汐流等) は、水深の 1/7 乗で減少し、海底で流速ゼロになる分布が仮定される。海流の極値流速は、これらの和として求められる。

したがって、吹送流の表層流速の極値を必要とする場合も、該当する再現期間における風速極値 (海面上 10m) の 10% として求める。水中流の極値は、吹送流の影響が及ばない水深 20m 以深の流れを、JCOPE2 の極値統計解析から求め、これに鉛直分布を当てはめる。この場合も、JCOPE2 と JCOPE-T (2.1.1 項参照) の相関を求めて補正することが必要である。

## 第2章 海洋の風・波・流れ

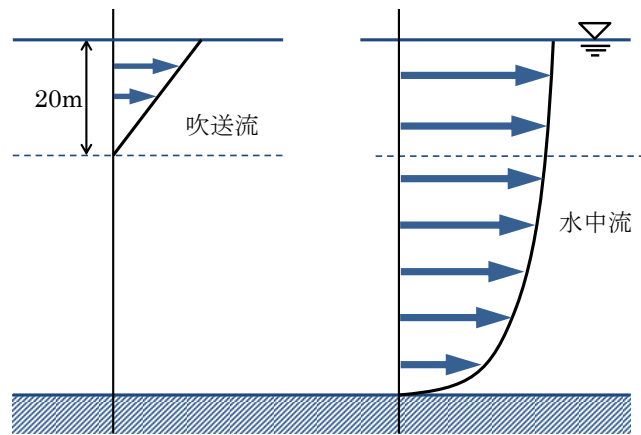


図 2.2.4 吹送流と水中流の鉛直分布

以上は、海流の場合である。潮流は地形影響を強く受けるため地域性が強い。したがって、現地観測によることが原則となる。

## 第2章 海洋の風・波・流れ

### 2.3 気象海象の現地観測法

#### 2.3.1 風況

風向・風速計の主なものを図 2.3.1 に示す。これらは長年の使用実績があり、信頼性のあるデータが得られるが、点計測であるため、風車に流入する高高度かつ広範囲の風を把握するためには、観測タワーが設置必要である。特に洋上の場合は、大規模な施設が必要になる(図 2.3.2)。



3杯式（風杯型）風速計（左）、矢羽根式風向計（右）



風車式風向風速計



三次元超音波風向風速計

図 2.3.1 風向風速計の例

(出典：(上) Met Office ウェブサイト、(左下) 気象庁父島気象観測所ウェブサイト、  
(右下) 東京理科大学理工学部ウェブサイト)

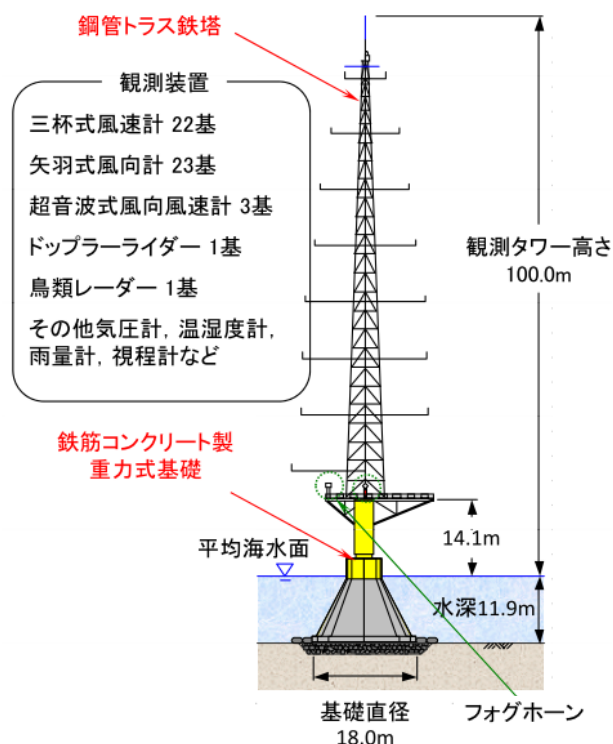


図 2.3.2 NEDO 実証研究（千葉県銚子沖）における観測タワー  
 (出典：NEDO ウェブサイト)

近年では、リモートセンシング (remote sensing) 技術が利用されつつある。風況を観測するリモートセンシング機器では、ドップラーライダー (Doppler LIDAR : Doppler Laser Imaging Detection And Ranging) が代表的なものである。

ドップラーライダーはレーザー光を発射して、大気中のエアロゾル (塵、微粒子、水粒など) からの反射光を受信し、ドップラー周波数変化からその移動速度を風速として計測するものである。また、レーザー光の往復時間から計測領域までの距離を計測するため、上空の風速分布の計測を遠隔で行うことが可能である。大雨などの気象条件によりデータが欠測する場合があるが、高出力のものは1km以上のレンジがあるため、風車ロータの到達高度を十分にカバーすることができる。

レーザー光の代わりに音波を使用し、温度・湿度・風速の不均一による大気の屈折率の揺らぎを計測するドップラーソナー (Doppler SODAR : Doppler SOnic Detection And Ranging) も製品化されている。

## 第2章 海洋の風・波・流れ

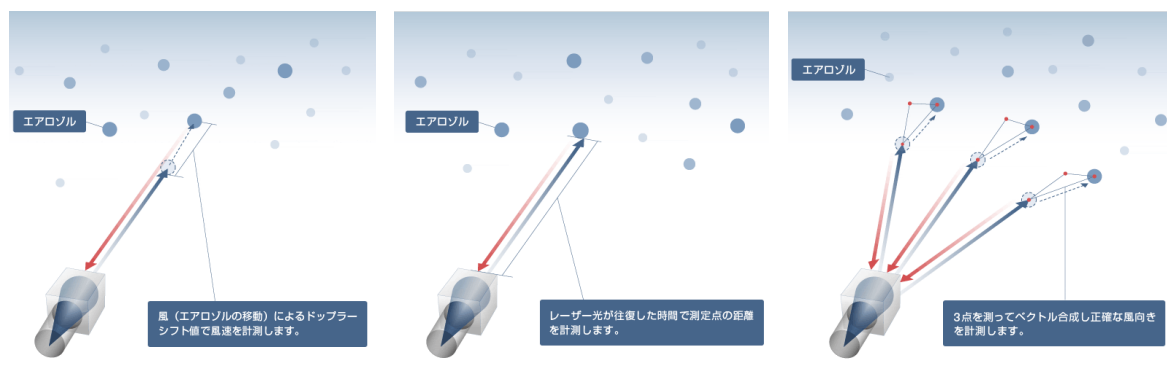


図 2.3.3 ドップラーライダーの原理  
(出典：三菱電機ウェブサイト)



図 2.3.4 ドップラーライダーの例  
(出典：三菱電機ウェブサイト)

ここで、観測タワーを建設せずに洋上の風況を観測することを考える。

陸からの距離が近い場合には、陸上に出力の大きいライダーまたはソーダーを設置することで対応可能である(図 2.3.5)。ただし、福島浮体式洋上ウィンドファーム実証研究事業(離岸距離 20km)のように遠方に設置される場合も十分に考えられるため、この方法は限られる。

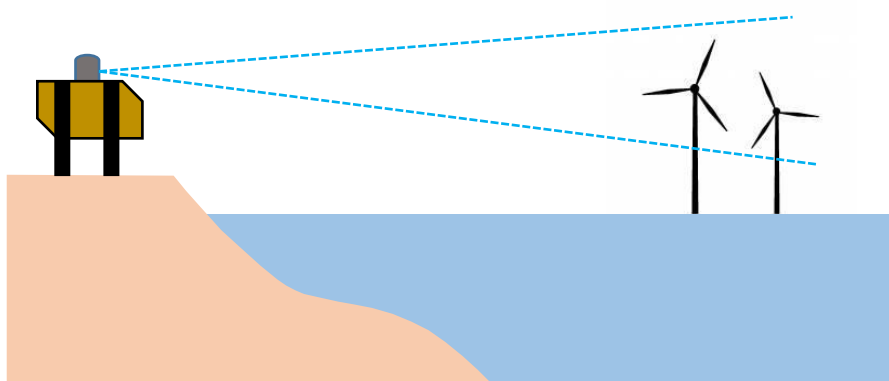


図 2.3.5 洋上風況の陸上からの計測

## 第2章 海洋の風・波・流れ

風車支持構造物（wind turbine support structure）に設置する場合は、図 2.3.6 のような方法が想定される。上方照射は最も簡便であるが、風向によっては風車による乱れの影響を強く受ける。斜方向照射は風車の影響をある程度軽減できるが実績はないようである。水平照射は、特にダウンウィンド（downwind）風車では風上の風況を計測できるため有用と考えられる。

なお、支持構造物（support structure）が浮体式（floating）の場合は動揺を補正する必要がある。動揺補正法の研究は行われており、補正処理を組み込んだ製品もある。



図 2.3.6 洋上風力発電施設からの風況計測  
(出典：石田茂資、二村正、2016)

### 2.3.2 波浪

波浪計の分類を表 2.3.1 に示す。波浪計には、波高と周期のみを計測する機器と、これらに加えて波向の計測や方向スペクトル（方向分布）の出力が可能な装置もある。

以下に、センサー型式毎に測定原理、特性を記載する。

表 2.3.1 波浪計の分類

機種	測定原理	設置方式	測定項目
固定設置	超音波式 水圧式	海底設置	波高、周期、(波向)
ブイ式	加速度式 GPS 式	係留設置	波高、周期、(波向)
レーダー式	短波レーダー マイクロ波レーダー	陸上設置 発電浮体設置	波高、周期、波向、 (方向スペクトル)、 表層流速、波向

※測定項目の（ ）は、機器によって計測可能な項目を示す。



## 第2章 海洋の風・波・流れ

### (1) 固定設置式

#### ① 超音波式

超音波パルスを海面に向かって発信し、反射波が戻るまでの時間を距離に換算して、海面の水位変化を測定する。実用的には 50m より浅い海域で利用される。暴風等により表層が泡で満たされると計測が困難となる。海底設置型が多く、比的較高精度の観測が可能である。

#### ② 水圧式

水圧変動を圧力センサーにより計測し、微小振幅波理論を用いて海面の上下変位に換算する。水深が深くなるにつれて圧力変動が減衰する点に考慮する必要がある。

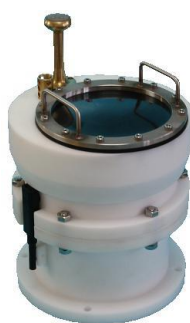


図 2.3.7 海底設置型超音波／水圧式波浪計の例  
(出典：アイオーテックニク社ウェブサイト)

### (2) ブイ式

#### ① 加速度式

波面の上下に追従するブイの上下加速度を計測し、これを 2 回積分することで垂直変位を算出する。観測対象の波周期よりも固有周期が十分に短いブイを使う必要がある。ブイの動きを加速度センサー、傾斜計、コンパス等で計測することで波向を観測できる機器もある。



図 2.3.8 ブイ式加速度式波浪計の例  
(出典：AXYS Technologies 社ウェブサイト)

## 第2章 海洋の風・波・流れ

### ② GPS 式

波面の上下に追従する小型浮体に GPS 受信機や各種センサーを搭載し、水面変動を計測する。波向および風向・風速などの観測を行うものもある。

GPS 式は、固定点における GPS 測位に基づく補正データが必要なため、陸上局と常時無線交信するものが多く、その場合離岸距離に制限がある。近年では、地震津波などの長周期波の観測も可能となり、防災への活用も期待されている。

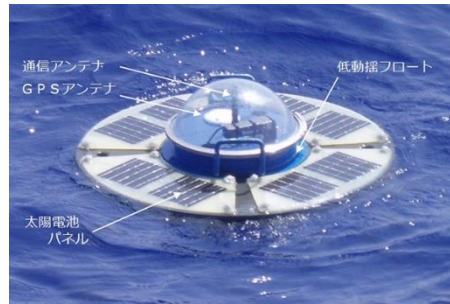


図 2.3.9 GPS 式波浪計の例  
(出典：ゼニライトブイ社ウェブサイト)

### (3) レーダー式

海面に向けて短波やマイクロ波を発射し、海面の動きに応じたドップラー効果により変調された後方散乱波を測定することで波浪を観測する。レーダー波を海面に発射すると大部分のエネルギーは前方に反射するが、視線方向に伝搬する波の成分の中で、レーダー波の  $1/2$  波長の成分がレーダー波を後方に強く散乱する（ブラッグ共鳴散乱）。この後方散乱波を解析することで、風向、有義波高、卓越周波数、海面における流れ等が推定できる。

2 基以上の基地局を設置する場合、波高、波周期に加えて波向き、波の方向スペクトルも得られる。また、表層の流速と流向を計測することができる。一方、海上風が弱い場合は、海面からの反射が弱くなり計測できない場合がある。

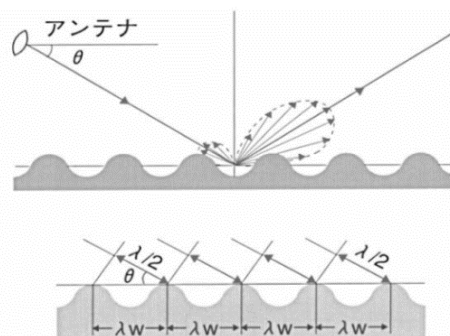


図 2.3.10 電波と波浪成分波のブラッグ共鳴散乱  
(出典：千葉修等、2005)

## 第2章 海洋の風・波・流れ

### 2.3.3 流れ

#### (1) 計測原理と特徴

流れを測る場合のコンセプトとして、計測器を定点に固定する方法（オイラー（Euler）型）の他、漂流ブイの移動を追跡する方法（ラグランジュ（Lagrange）型）もある。後者は海流発電のポテンシャル調査等に適するが、発電施設の設置海域の調査を行うことができないため、以下では省略する。

定点固定式の流速計の種類は、その測定原理から大きく5種類に分類できる（表 2.3.2）。

表 2.3.2 流速計の分類

機種	測定原理	設置方式	備考
回転式流速計	プロペラ・ロータ式	係留	
電磁流速計	電磁誘導式	係留、海底設置	
超音波流速計	超音波ドップラー式	海底設置	
超音波ドップラー流速計	超音波ドップラー式	海底設置、曳航	多層での取得が可能
短波レーダー式流速計	電磁波ドップラー式	陸上設置	表層流を取得

#### ① 回転式流速計

回転翼の回転数または回転力により流速を測定する。広く用いられてきたが、近年は使用海域が限定されつつある。

#### ② 電磁流速計

ファラデー（Faraday）の法則を利用し、磁界中を電導体である水が移動する際に発生する誘起電圧から流速を測定する。可動部がないため応答性・安定性に優れている。気泡の影響を受けにくいので、高波浪時や砕波帯での観測にも対応可能であるが、外部を流れる電流の変化によってノイズが混入する可能性がある。

#### ③ 超音波流速計

対向する一对の送受信部から超音波パルスを発信し、到達までの時間差から流速を求める。これを直角に二対配置することで流向測定が可能となる。可動部がないため応答性・安定性に優れるが、気泡の混入が多い高波浪時などで異常値が出ることが多い。

#### ④ 超音波ドップラー流速計（ADCP：Acoustic Doppler Current Profiler）

海中の散乱体（プランクトンやチリなどの浮遊懸濁物）からの反射音の周波数変化（ドップラーシフト）を利用して流れを測定する。異なる方向にビームを発射するため、3～4個のトランスデューサ（transducer）を持つ。3次元の流速成分を多層にわたって計測でき、水深の測定も可能である。固定式の他、船舶への設置も可能である。

#### ⑤ 短波レーダー式流速計

電波の発射波および反射波のドップラー効果を利用する。複数局の解析結果を合成す

## 第2章 海洋の風・波・流れ

ることで、表層の流向・流速分布を広範囲で面的に取得することができる。

### (2) 計測点の配置

沿岸域では、場所がわずかに異なるだけで流況が変化することがあるため、設置予定位置の周辺に補助的な計測点を配置することが望ましい。一方、近年では ADCP を設置した船舶により、対象とする水路における横断面のプロファイルを捉えることが行われている。また、水平方向に等間隔に配置した測線に沿って走航することで、流れの空間分布を把握することが可能である (図 2.3.11)。

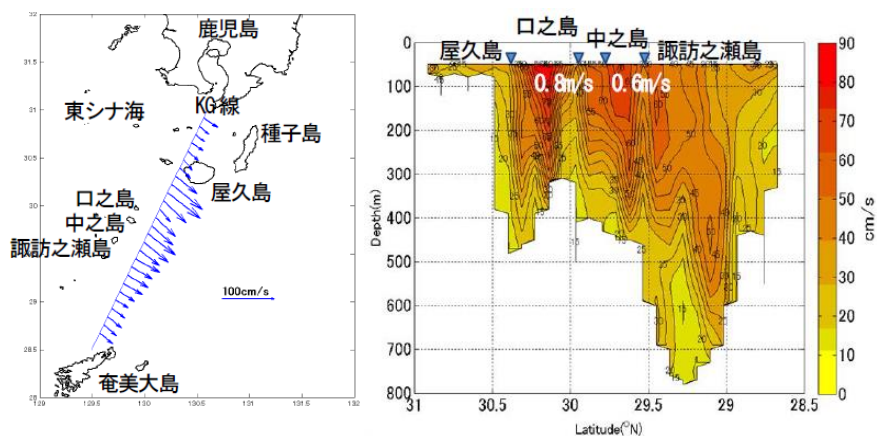


図 2.3.11 ADCP での計測例 (左：測線上の流速分布、右：鉛直断面図)  
(出典：小牧裕幸等、2013)

固定点の流速を長期間計測する際は機器を固定するが、水深や重視する層の深さにより、係留式と海底設置式を使い分ける。ただし、係留方式は、波によるブイの上下動がデータに悪影響を及ぼす危険性がある。一方、海底設置式は設置やメンテナンスが煩雑となる。

## 第2章 海洋の風・波・流れ

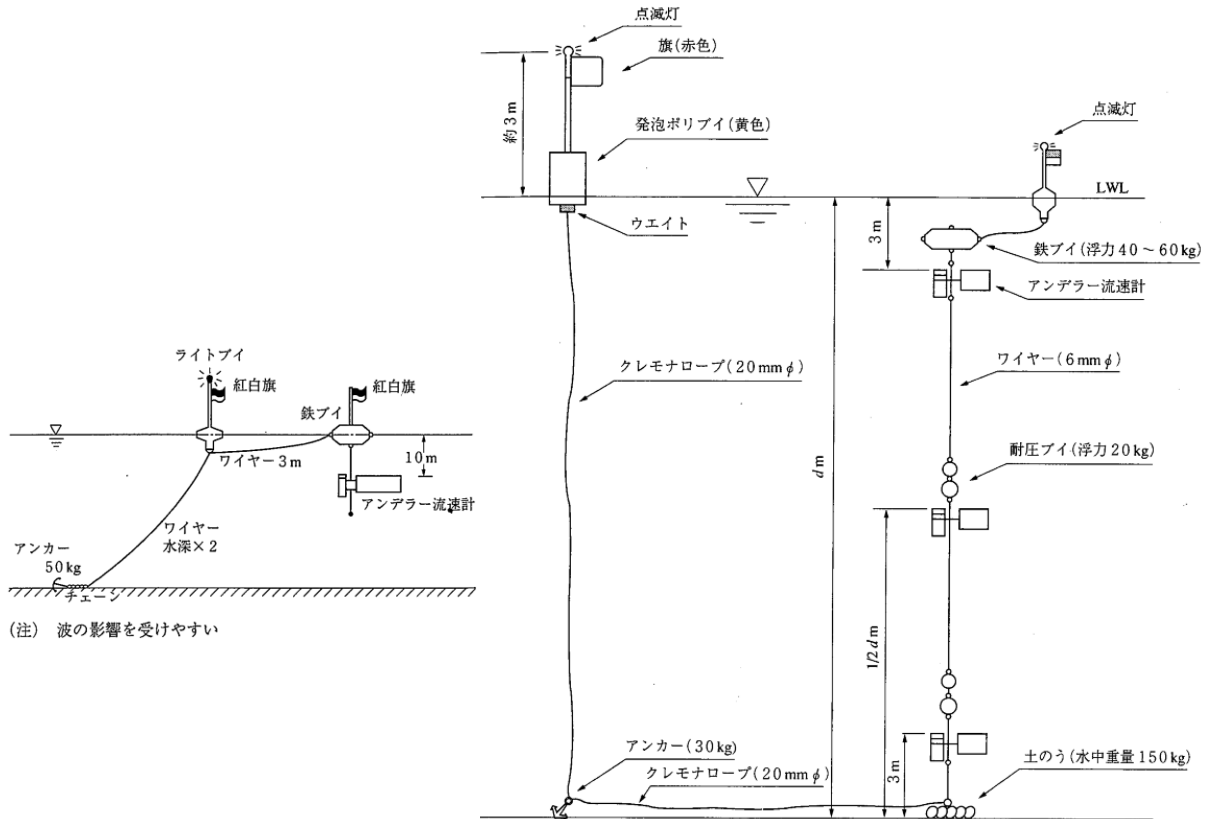


図 2.3.12 流速計の係留方法 (左：釣り下げ式、右：立ち上げ式)  
(出典：平野敏行、1998)

### (3) 計測時期

潮流は天体の引力により海水が流動する周期的な現象である。潮位が極大となる満潮、極小となる干潮は、多くの場所で1日2回観測され、満潮と干潮に挟まれた時間帯に海水が流動する。また、約15日間で「大潮→小潮→大潮」と変化し、大潮期は干満差が大きく、潮流も速くなる。

一方、海流は地球規模の風の循環により表層水が駆動される大規模流である。海流はほぼ定常状態を保ちながら川のように流れる。したがって、このような流れの挙動を踏まえた上で観測時期や期間を設定することが必要である。

#### ① 潮流

潮流では、多くの場合、重要な指標である調和定数が観測結果から算出される。調和定数は60成分あるが、主要な分潮を精度良く分離する観点から、以下のいずれかで行うことが望ましい。

- ・ 1 昼夜 (25 時間) : 8 分潮程度。ただし小潮期に設定しないこと。
- ・ 15 昼夜 (15 日) : 10 分潮
- ・ 32 昼夜 (31 日と 8 時間) : 29 分潮
- ・ 370 昼夜 (369 日と 1 時間) : 60 分潮

## 第2章 海洋の風・波・流れ

この他、吹送流や密度流が大きい海域では、それぞれの卓越要因との関連をつかむために、長期間の観測が望ましい。なお、主要地点における調和定数は、海上保安庁が発行する「書誌第742号、日本沿岸潮汐調和定数表」に掲載されている。

### ② 海流

日本近海の代表的な海流である黒潮には、大きく分けて2種類の安定した流路のパターン(図2.3.13中の数字1と2)があるが、気象海象条件により大蛇行流路(同図中の数字3)が生じる。このような状況を把握した上で観測時期と位置を決定する必要がある。

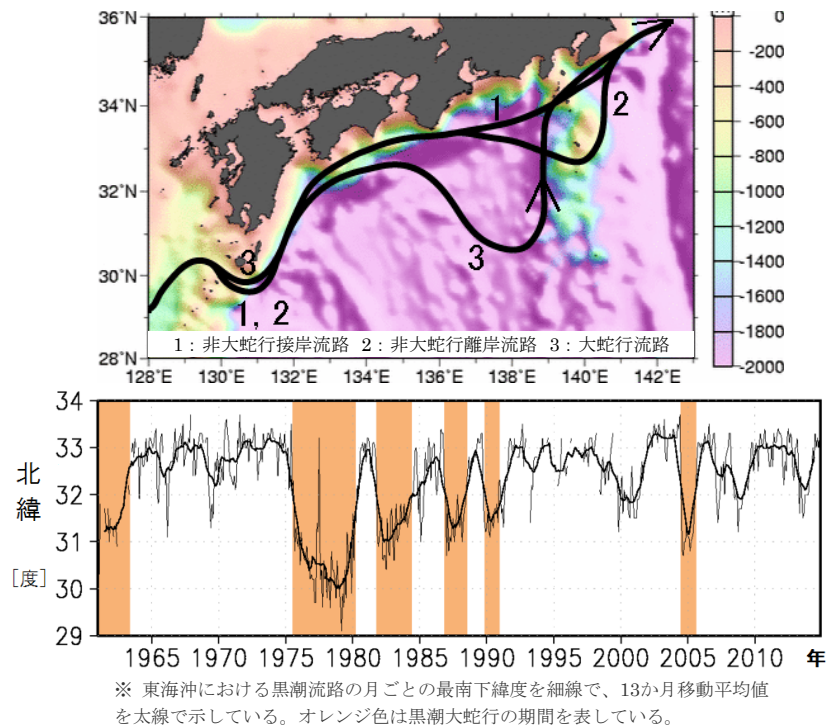


図 2.3.13 黒潮の流路(上)、および大蛇行の出現状況(下)  
(出典: 気象庁ウェブサイトの図を一部改変)

### (4) 計測データの解析

#### ① 調和解析

前述のように、潮汐はいくつかの周期運動(分潮)の和として表すことができる。潮流は潮汐に伴う海水の流動であり、潮汐の分潮に対して分潮流を考えることができ、観測値(分速値)が次式で表されるものとする。

$$\begin{aligned}
 V_t &= V_0 + \sum V_i \cos(\omega_i t - K_i + \alpha_i) \\
 &= V_0 + \sum V_i \cos\left(\frac{2\pi}{T_i}(t - \tau_i) + \alpha_i\right)
 \end{aligned}
 \tag{2.3.1}$$

## 第2章 海洋の風・波・流れ

ここで、

- $V_t$  : 任意時刻における観測値
- $V_n$  : 恒流（観測時間の平均値）
- $V_i$  : 各分潮流の振幅（流速）
- $\omega_i$  : 各分潮の角速度
- $K_i$  : 各分潮の遅角（天体が観測地点の真上を通過してからの位相遅れ）
- $\tau_i$  :  $K_i/\omega_i$
- $T_i$  : 各分潮の周期
- $a_i$  : 各分潮の天文引数（定数）
- $i$  : 分潮を示す添字
- $t$  : 時刻

恒流とは、周期性を持たない流れの総称であり、風による吹送流、波による海浜流、海水密度の差による密度流等がある。特に、潮汐だけが原因で発生するものを潮汐残差流という。調和解析とは、観測値  $V_t$  および既知数  $a_i$  から調和定数  $V_i$  および  $K_i$  を求めることである。調和定数は観測地点固有の値である。一般には主要四分潮と呼ばれる  $K_1$ ,  $O_1$ ,  $M_2$ ,  $S_2$  が大きな流速値を示すことが多い。調和定数は、潮汐に関するものであれば気象庁のウェブサイトで主要な地点の値が公開されている。

表 2.3.3 主要 10 分潮の諸元

記号	分潮名	角速度 (deg/時)	周期 (時)
$K_1$	日月合成日周潮	15.0411	23.93
$O_1$	主太陰日周潮	13.9430	25.82
$P_1$	主太陽日周潮	14.9589	24.07
$Q_1$	主太陰楕率日周潮	13.3987	26.87
$M_2$	主太陰半日周潮	28.9841	12.42
$S_2$	主太陽半日周潮	30.0000	12.00
$K_2$	日月合成半日周潮	30.0821	11.97
$N_2$	主太陰楕率半日周潮	28.4397	12.66
$M_4$	太陰 1/4 日周潮	57.9682	6.21
$MS_4$	複合潮	58.9841	6.10
$V_0$	恒流	-	-

## 第2章 海洋の風・波・流れ

### ② 潮流楕円

潮流楕円は、座標原点から各時刻の潮流をベクトルで描いてその先端を結んだものであり、最大流速の方向が楕円の長軸を表す。また、楕円形状が円形に近いほど等方的な性質、楕円の扁平率が大きいほど往復流的な性質を示す。

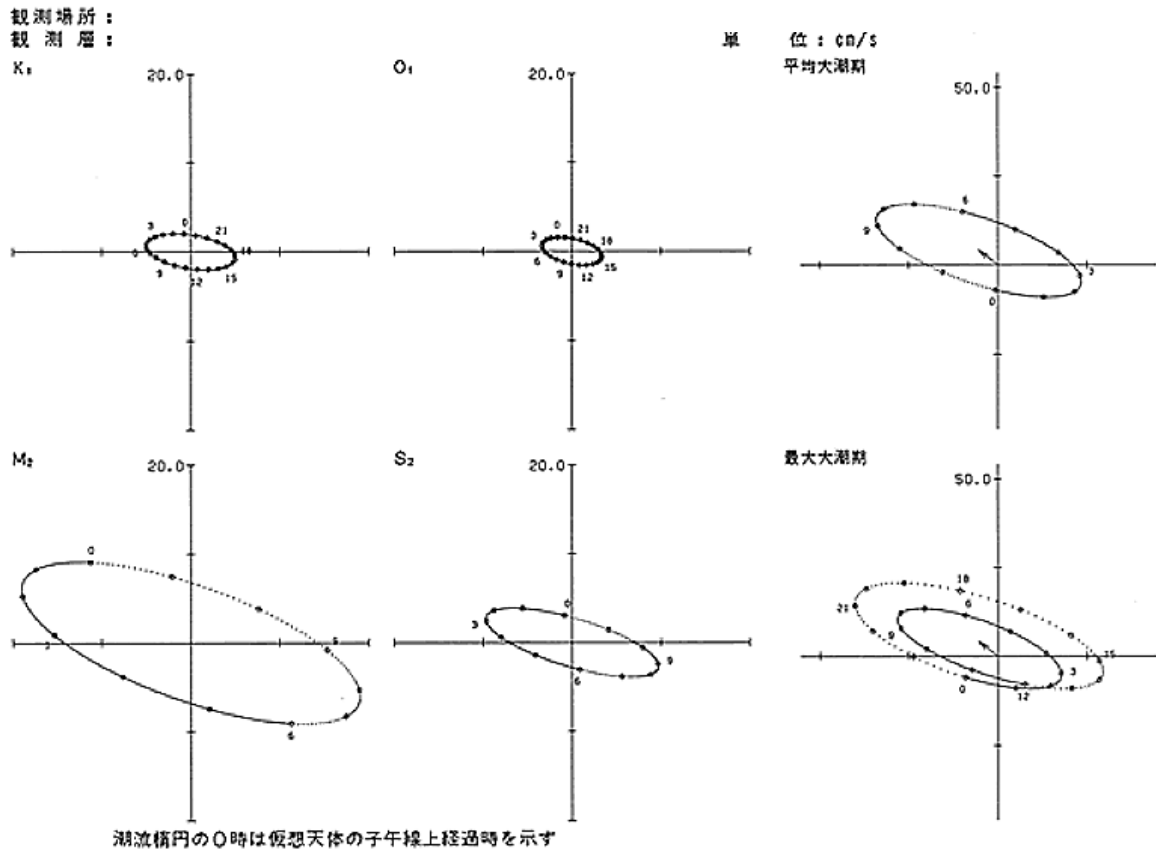


図 2.3.14 潮流楕円の例  
(出典：沿岸海洋調査ウェブサイト)



## 第2章 海洋の風・波・流れ

### 2.4 洋上施工と気象海象の関係

#### 2.4.1 洋上施工と作業船

洋上施工では、以下のような様々な作業船が利用される。

##### (1) 調査段階

- ① 地質調査船
- ② 気象・海象観測船

##### (2) 設置段階

- ① はしけ (barge、バージ)
- ② 重量物運搬船
- ③ クレーン船 (図 2.4.1)
- ④ タグボート
- ⑤ アクセス船 (service vessel)
- ⑥ SEP 台船 (SEP: Self Elevating Platform、自己昇降式作業台船) (図 2.4.2)
- ⑦ アンカーハンドリング・タグサプライ船 (図 2.4.3)
- ⑧ ケーブル敷設船
- ⑨ ROV 母船 (ROV: Remotely Operated Vehicle、遠隔操作無人潜水機)
- ⑩ 潜水作業支援船
- ⑪ 監視・警戒船

##### (3) 運用段階

- ① アクセス船
- ② 保守管理作業船

この他にも、着床式 (bottom-mounted) 風車が多数建設されている欧州では、風車の運搬・設置を行う専用船も建造されている。

これらの船と作業には、それぞれに稼動・作業できる限界海象が存在する。例えばアクセス船では、アクセス対象となる施設に乗り移る時が最も危険であり、主に波高が関係する。クレーン船を使用して風車あるいはブレードを取り付ける場合には、海面上 100m 程度においてボルトの位置決めが要求されるため、風速、波高だけでなく波周期も重要になる。波高が低くても船やクレーンとの同調が発生すれば作業はできない。一方、SEP 台船は深い海域では使用できないが、脚を海底に固定するため限界海象は高い。

## 第2章 海洋の風・波・流れ



図 2.4.1 クレーン船  
(出典：日本埋立浚渫協会)

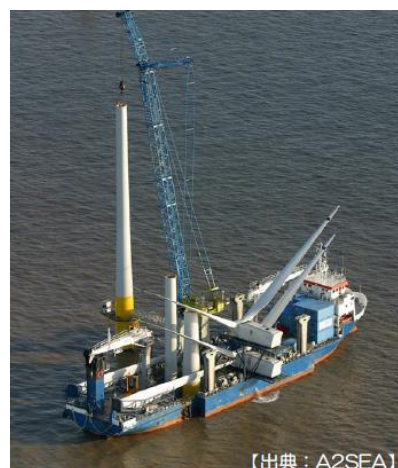


図 2.4.2 SEP 台船  
(出典：日本埋立浚渫協会)



図 2.4.3 アンカーハンドリング・タグサプライ船  
(出典：日本埋立浚渫協会)

2.4.2 静穏海象発現特性の評価法

洋上作業を計画する場合、まず静穏海象 (calm sea) が発生する割合で評価するが、作業にはある程度の日数が必要であり、中断できない作業もある。したがって、単なる静穏海象の発生率ではなく、静穏海象の継続時間を考慮したウェザーウィンドウ (weather window) 解析が必要になる。本項では、波高を対象として評価手法を概説する。

静穏海象の発現特性を評価する指標として、①非超過確率、②静穏海象継続時間割合、が利用される。この他により高度な指標として静穏時作業可能確率なども提案されているが、詳しくは参考資料 (例えば、谷口、2015) を参照のこと。

(1) 非超過確率

波高を例に取り、作業可能な波高の閾値  $H_{SL}$  に対応する超過確率 (exceedance probability) を  $P(H_{SL})$  とすれば、非超過確率 (non-exceedance probability) は  $1 - P(H_{SL})$  で与えられ、全評価時間に対する作業可能海象の発現割合が得られる。実際には静穏な海象が切れ切れではなく、ある程度の長さ (ウィンドウ長、以降  $WL$  と呼ぶ) 継続することが必要であるが、この方法では  $WL$  の影響を考慮することができない。

(2) 静穏海象継続時間割合 ( $P_{per}$ )

気象海象条件の閾値と  $WL$  を設定し、閾値以下の気象海象が  $WL$  以上継続する割合を求める。図 2.4.4 に示すように、閾値以下の気象海象継続時間を  $Ph(i)$  とおく。  $Ph(i)$  の期間中に確保できるウィンドウ数は、  $Ph(i)$  を  $WL$  で割った商 (余りは切り捨て) であり、これを  $Q(Ph(i)/WL)$  と表記する。すると  $P_{per}$  は次式で算出できる。なお、式中の  $T$ 、  $N$  は、全評価時間および全評価時間の中で閾値以下の海象が発現する回数である。

$$P_{per} = \sum_{i=1}^N \{Q(Ph(i)/WL) \times WL\} / T \quad (2.4.1)$$

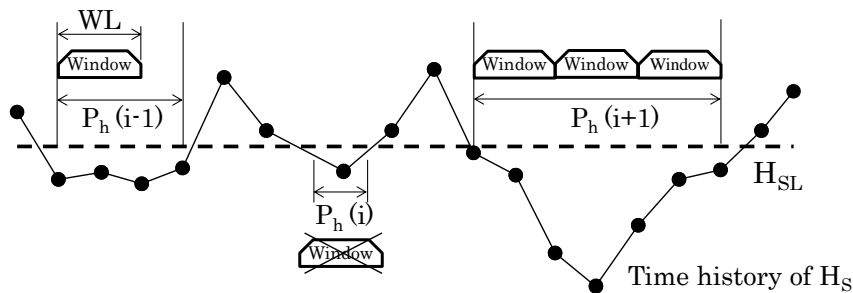


図 2.4.4 静穏海象継続時間割合

## 第2章 海洋の風・波・流れ

### 参考-1 不規則波のエネルギーとパワー

海洋の波（不規則波）は、様々な周波数  $f$ （対応する周期、波長）を持つ規則波（成分波）が重なったものとして扱われ、スペクトル密度関数  $S(f)$  によって表現される。 $S(f)$  から、各周波数を持つ成分波の分布を把握することができる。図 参-1.1 では、横軸の単位が Hz ( $s^{-1}$ )、縦軸の単位が  $m^2sec$  であるから、面積の単位は  $m^2$  になっている。このことから分かるように、スペクトル密度関数は波のエネルギーの分布を表す。

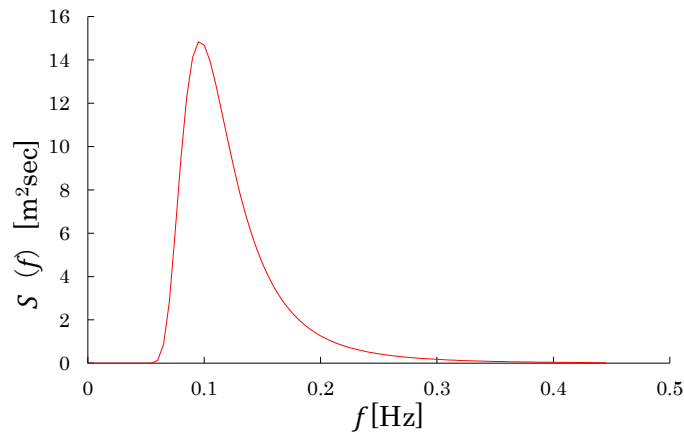


図 参-1.1 有義波高 4m、有義波周期 8sec のスペクトル密度関数の例

海面の単位面積当たりの不規則波の波エネルギー  $E$  [ $J/m^2$ ] は、水の密度  $\rho_w$  [ $kg/m^3$ ]、重力加速度  $g$  [ $m/s^2$ ] および  $S(f)$  によって次式のように求められる。

$$E = \rho_w g \int_0^{\infty} S(f) df \quad (\text{参-1.1})$$

また、波の単位幅（紙面に垂直方向）当たりのパワー  $P$  [ $W/m$ ] は、群速度  $C_g$  [ $m/s$ ] を用いて次式で計算される。

$$P = \rho_w g \int_0^{\infty} S(f) C_g df \quad (\text{参-1.2})$$

$S(f)$  の一般形として、次式がよく用いられる。ここで、 $A$  [ $m^2/s^4$ ] と  $B$  [ $s^{-4}$ ] は、それぞれ有義波高と有義波周期から決まる係数である。

$$S(f) = A f^{-5} \exp(-B f^{-4}) \quad (\text{参-1.3})$$

よって、

$$E = \frac{\rho_w g A}{4 B} = \rho_w g \frac{H_s^2}{16} \quad (\text{参-1.4})$$

## 第2章 海洋の風・波・流れ

ここで、 $H_s$  [m]は有義波高である。式(2.1.17)で示した規則波のエネルギーと比べ、有義波高を波高と見なすと不規則波のエネルギーは  $1/2$  となっている。このとき、 $H_s$  はスペクトルの面積  $m_0$  [m<sup>2</sup>]と以下の関係がある。

$$H_s = 4\sqrt{m_0} \quad (\text{参-1.5})$$

ここで、 $m_n$  はスペクトルのモーメントと呼ばれ、以下で定義される。

$$m_n = \int_0^\infty f^n \cdot S(f)df = \int_0^\infty T^{-n} \cdot S(f)df \quad (\text{参-1.6})$$

不規則波のパワーは、同様に波の群速度を掛け合わせて、

$$P = C_g E = \frac{\rho_w g^2}{64\pi} H_s^2 T_e \quad (\text{参-1.7})$$

なお、ここでは、簡単のため深海波を仮定している。 $T_e$  は波エネルギー周期 (wave energy period) と呼ばれる量であり、次式で定義される。

$$T_e = \frac{m_{-1}}{m_0} \quad (\text{参-1.8})$$

## 第2章 海洋の風・波・流れ

### 参考-2 極値統計解析の手順

ここでは、2.2節で述べた極値統計解析の手順について、波高を例として説明する。

- 1) 与えられたデータ（例えば年毎の最大波高）を大きい順に並び替えて順序統計量  $x(m)$  ( $m=1,2,\dots,N$ 、 $N$ ：標本数) とする。
- 2) 次のプロットイング・ポジション公式 (plotting position formula) および表 参-2.1、表 参-2.2 により、 $N_T = N$  として  $x(m)$  に対する非超過確率  $F_m$  を求める。

$$F_m = 1 - \frac{m - \alpha}{N_T + \beta} \quad (\text{参-2.1})$$

ここで、表中  $k$  は形状母数である。2.2.2 項参照のこと。

表 参-2.1 極値分布関数 (再掲)

分布関数	非超過確率	確率密度関数
極値 I 型分布 (グンベル分布)	$F(x) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{x-B}{A}\right)\right]$ , $-\infty < x < \infty$	$f(x) = \frac{1}{A} \exp\left[-\frac{x-B}{A} - \exp\left(-\frac{x-B}{A}\right)\right]$
極値 II 型分布 (フレシエ分布)	$F(x) = \exp\left[-\left(1 + \frac{x-B}{kA}\right)^{-k}\right]$ , $B - kA \leq x < \infty$	$f(x) = \frac{1}{A} \left(1 + \frac{x-B}{kA}\right)^{-(1+k)} \exp\left[-\left(1 + \frac{x-B}{kA}\right)^{-k}\right]$
極値 III 型分布	$F(x) = \exp\left[-\left(\frac{B-x}{A}\right)^k\right]$ , $-\infty < x \leq B$	$f(x) = \frac{k}{A} \left(\frac{B-x}{A}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{B-x}{A}\right)^k\right]$
ワイブル分布	$F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x-B}{A}\right)^k\right]$ , $B \leq x < \infty$	$f(x) = \frac{k}{A} \left(\frac{x-B}{A}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{x-B}{A}\right)^k\right]$

(出典：合田良實、2008 を参考に作成)

表 参-2.2 プロットイング・ポジション公式の係数

分布関数	$\alpha$	$\beta$
極値 I 型分布 (グンベル分布)	0.44	0.12
極値 II 型分布 (フレシエ分布)	$0.44 + 0.52/k$	$0.12 - 0.11/k$
ワイブル分布	$0.20 + 0.27/\sqrt{k}$	$0.20 + 0.23/\sqrt{k}$

(出典：土木学会、2010 を参考に作成)

## 第2章 海洋の風・波・流れ

- 3) それぞれの  $F_m$  に対して基準化変量  $y(m)$  を計算する。例えば極値 I 型分布、極値 II 型分布、ワイブル分布では以下のように表される。

$$\text{極値 I 型分布 (ゲンベル分布)} : y(m) = -\ln(-\ln F_m) \quad (\text{参-2.2})$$

$$\text{極値 II 型分布 (フレシェ分布)} : y(m) = k \left[ -\ln(-\ln F_m)^{-1/k} - 1 \right] \quad (\text{参-2.3})$$

$$\text{ワイブル分布} : y(m) = [-\ln(1 - F_m)]^{1/k} \quad (\text{参-2.4})$$

- 4) 順序統計量  $x(m)$  が基準化変量  $y(m)$  の直線回帰式で表されるとして、最小自乗法により、尺度影響母数  $\hat{A}$  と位置母数  $\hat{B}$  を推定する。併せて、直線回帰による相関係数を評価しておく。この際、波高が高い部分と低い部分で傾向が異なる場合には、高い部分のみを用いることが推奨される。

$$x(m) = \hat{A}y(m) + \hat{B} \quad (\text{参-2.5})$$

- 5) 以下の 3 種類の基準に基づき、最適な分布関数を決定する。

- ・REC (REsidue of Correlation coefficient) 基準 : 分布関数毎に相関係数の残差の 95%非超過確率を求めておき、極値データをその分布関数に当てはめた時の相関係数の残差がこの限界値を超えた時は不適合としてその関数を棄却する基準
- ・DOL (Deviation of OutLier) 基準 : データの中の最大値を全体の平均値と標準偏差を用いて無次元化し、この値が当てはめる分布関数における 5%値以下、あるいは 95%値以上であれば不適合としてその関数を棄却する基準
- ・MIR (MInimun Ratio of residual) 基準 : 相関係数の 1 に対する残差の平均値が分布関数によって異なることを考慮し、標本の相関係数の残差と当てはめた分布における残差平均値との比率が最小のものを最適と判断する基準

- 6) 所定の再現期間  $R$  (50 年) に対する再現確率統計量  $x_R$  を計算する。

$$x_R = \hat{A}y_R + \hat{B} \quad (\text{参-2.6})$$

参考までに極値解析の事例として、用いたデータ、解析結果を以下に示す。

## 第2章 海洋の風・波・流れ

表 参-2.3 極東アラスカでの有義波高極大値サンプルデータ

年	極大波高 $H_s(m)$	年	極大波高 $H_s(m)$
1956	6.2	1966	7.3, 8.6, 7.4
1957	—	1967	7.1, 6.0, 6.3, 6.0, 6.7
1958	8.8, 6.6, 6.9, 7.8, 6.3	1968	6.6, 6.5, 6.9, 7.7, 8.2, 6.7, 7.4
1959	11.7, 7.2, 7.4	1969	6.4, 6.1, 7.1, 6.5, 8.5, 8.8, 9.1
1960	9.9, 8.9, 7.5, 7.0, 6.7	1970	8.0, 6.3, 9.1
1961	9.2, 6.2, 6.3	1971	6.6
1962	8.1, 6.3, 7.2, 6.3, 6.0	1972	6.7, 7.2, 10.2, 7.0, 10.1
1963	8.4, 6.8, 9.3, 6.7, 6.5, 7.2, 8.5	1973	7.8, 6.1, 6.3, 8.6, 7.1, 10.0
1964	6.9, 6.6, 9.4, 8.2	1974	8.0, 6.1, 8.4
1965	6.3, 7.6	1975	7.4, 8.2, 8.1

(出典：合田良實、2008)

表 参-2.4 極東アラスカでの有義波高極大値の解析例

[標本の大きさ： $N=78$ , 平均値： $\bar{x}=7.501$  m, 不偏標準偏差： $\sigma_x=1.214$  m, 平均発生率： $\lambda=3.9$ ]

順位 $m$	順序統計量 $x(m)$	極値Ⅱ型 ( $k=10$ )		極値Ⅰ型		ワイブル ( $k=1.4$ )		ワイブル ( $k=2.0$ )	
		$\hat{F}_m$	$y(m)$	$\hat{F}_m$	$y(m)$	$\hat{F}_m$	$y(m)$	$\hat{F}_m$	$y(m)$
1	11.7	0.9935	6.540	0.9928	4.934	0.9927	3.121	0.9922	2.204
2	10.2	0.9807	4.825	0.9800	3.903	0.9800	2.648	0.9795	1.971
3	10.1	0.9679	4.081	0.9672	3.402	0.9672	2.406	0.9667	1.845
4	10.0	0.9551	3.607	0.9544	3.065	0.9545	2.238	0.9539	1.754
5	9.9	0.9423	3.261	0.9416	2.811	0.9417	2.109	0.9412	1.683
6	9.4	0.9295	2.990	0.9288	2.606	0.9290	2.003	0.9284	1.624
74	6.1	0.0589	-0.989	0.0584	-1.044	0.0619	0.140	0.0607	0.250
75	6.1	0.0461	-1.063	0.0456	-1.128	0.0492	0.118	0.0479	0.222
76	6.0	0.0333	-1.152	0.0328	-1.229	0.0364	0.095	0.0351	0.189
77	6.0	0.0205	-1.270	0.0200	-1.364	0.0237	0.070	0.0224	0.150
78	6.0	0.0077	-1.464	0.0072	-1.597	0.0109	0.040	0.0096	0.098
母数推定値		$\hat{A}=0.8292$ m $\hat{B}=6.937$ m		$\hat{A}=0.9589$ m $\hat{B}=6.943$ m		$\hat{A}=1.8676$ m $\hat{B}=5.789$ m		$\hat{A}=2.6228$ m $\hat{B}=5.178$ m	
相関係数		$r=0.98736$		$r=0.99191$		$r=0.99629$		$r=0.98906$	
確率波高 (m)									
$R=10$ 年		10.56		10.44		10.51		10.20	
$R=20$ 年		11.42		11.11		11.13		10.65	
$R=50$ 年		12.65		12.00		11.91		11.20	
$R=100$ 年		13.66		12.66		12.48		11.58	
裾長さパラメータ $\gamma_{50}$		1.198		1.149		1.133		1.098	

(出典：合田良實、2008)



第2章 海洋の風・波・流れ

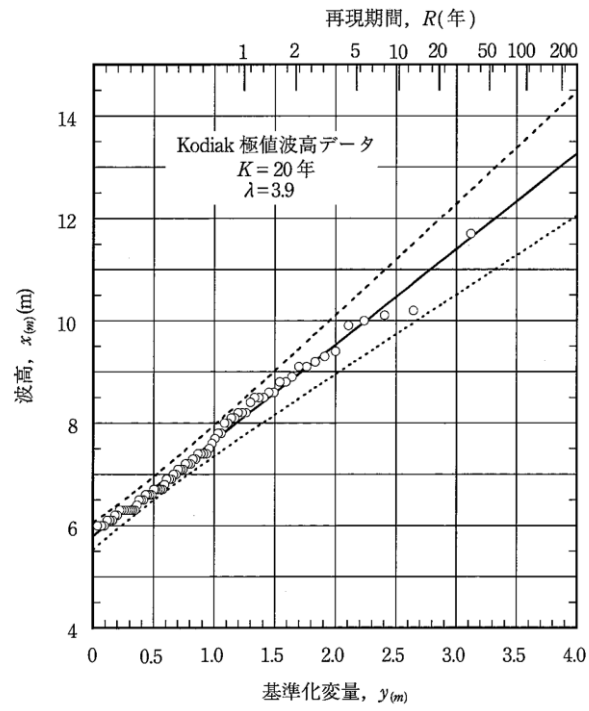


図 参-2.1 極東アラスカでの有義波高極大値のワイブル分布 ( $k=1.4$ ) 当てはめ結果 (出典: 合田良實、2008)

参考-3 逆一次信頼性解析法

平均風速  $V$  と有義波高  $H_s$  との再現期間 50 年の組合せを定義する環境等値線を生成する手法として逆一次信頼性解析法 (IFORM) がある。IFORM では、平均風速  $V$  および有義波高  $H_s$  の結合分布モデルを利用することにより、その結合分布の環境等値線を構築する。以下に概要を示す。

確率分布を相関がない二つの標準正規分布変数  $U_1$  および  $U_2$  から、次式の結合確率分布  $(V, H_s)$  に変換する。

$$(V, H_s) = \phi(U_1, U_2) \quad (\text{参-3.1})$$

上記の変換を行う一般的な方法の一つとして、次式に示すローゼンブラット (Rosenblatt) 変換の適用がある。

$$\Phi(U_1) = F_V(V)$$

$$\Phi(U_2) = F_{H_s}(H_s|V) \quad (\text{参-3.2})$$

ここで、

$\Phi$  : 標準正規累積分布関数 (CDF)

$F_V(V)$  : 平均風速の限界 CDF

$F_{H_s}(H_s|V)$  : 平均風速における条件付き有義波高の分布

ローゼンブラット変換の利点は、単純であること、ならびに  $F_V(V)$  および  $F_{H_s}(H_s|V)$  の二つの分布によって結合分布の表現が容易になることである。したがって、所要の確率変数変換は次式の通りとなる。

$$V = F_V^{-1}[\Phi(U_1)]$$

$$H_s = F_{H_s}^{-1}[\Phi(U_2)|V] \quad (\text{参-3.3})$$

この変換を用いることにより、次の手法で直ちに環境等値線が得られる。 $U_1 - U_2$  平面における半径  $\beta$  の円、すなわち、式  $U_1^2 + U_2^2 = \beta^2$  を満たす点は、 $V - H_s$  平面上の曲線に変換される。この曲線が環境等値線である。半径  $\beta$  は次式で定義される。

$$\Phi(\beta) = 1 - \frac{1}{N} \quad (\text{参-3.4})$$

ここで、

$N$  : 50 年間における独立な海況の数

## 第2章 海洋の風・波・流れ

海況の継続時間が3時間の場合、 $N = 50 \times 365 \times 24 / 3 = 1.46 \times 10^5$  のときは、 $\beta \approx 4.35$  である。海況の継続時間が1時間の場合は  $\beta \approx 4.60$  となる。海況継続時間が3時間の例は、図 参-3.1 による。通常は、環境等値線全体を求める必要はなく、最大有義波高が得られる部分（厳しい海況または高波浪時海況（SSS: Severe Sea State）と呼ばれる）を求めれば良い。この範囲では、この部分は、近似を用いずに次の通り求めることが可能である。運転範囲内の各平均速度  $V$  について、まず上式によって標準化された変数  $U_1$  を求める。

$$U_1 = \Phi^{-1}[F_V(V)] \quad (\text{参-3.5})$$

次に、この  $V$  を用いて  $U_s, SSS(V)$  で表される有義波高が次式によって得られる。

$$U_s, SSS(V) = F_{H_s}^{-1}[\Phi(\sqrt{\beta 2 - U_1^2})|V] \quad (\text{参-3.6})$$

図 参-3.1 で小円に挟まれた環境等値線の太線部分は、式 (参-3.5) および式 (参-3.6) から得たものである。この方法は、平均風速および有義波高の結合分布モデルへの依存度がかなり高いため、このモデルの適合度について統計的または視覚的な検定を実施しなければならない。

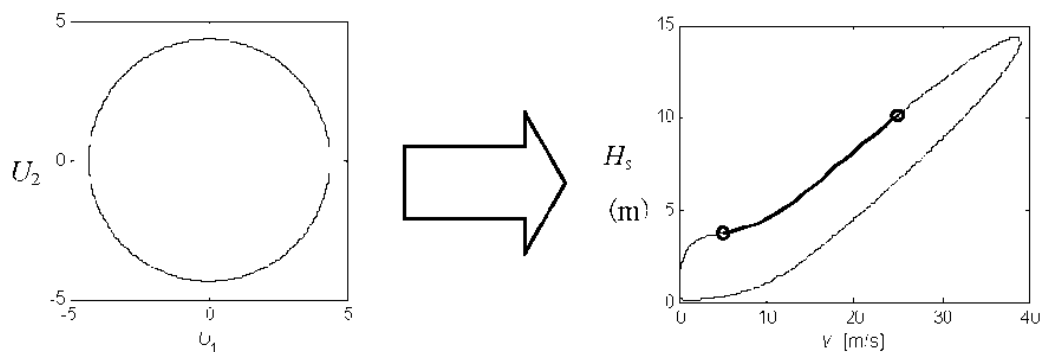


図 参-3.1 3時間分の海況に対する50年分の環境等値線の構築例  
(出典：日本工業規格、2014)

## 第2章 海洋の風・波・流れ

### <参考資料>

- 経済産業省資源エネルギー庁. 平成 22 年度新エネルギー等導入促進基礎調査事業 (風力エネルギーの導入可能性に関する調査). 経済産業省資源エネルギー庁. 2011-02-28.
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構. 海洋エネルギーポテンシャルの把握に係る業務報告書. 新エネルギー・産業技術総合開発機構. 2011-03.
- 環境省. 再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査. 環境省. 2012-06-01.  
<https://www.env.go.jp/earth/report/h23-03/>, (参照 2021-02-01).
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構. “NEDO NeoWins (洋上風況マップ)”. 新エネルギー・産業技術総合開発機構. [http://app10.infoc.nedo.go.jp/Nedo\\_Webgis/top.html](http://app10.infoc.nedo.go.jp/Nedo_Webgis/top.html), (参照 2021-02-01).
- 牛山泉. 風力エネルギー読本. オーム社, 2005.
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構. 着床式洋上風力発電導入ガイドブック. 第一版, 2015, 380p.
- 国土交通省気象庁. “数値予報とは”. 国土交通省気象庁.  
<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/whitep/1-3-1.html>, (参照 2021-02-01).
- 国土交通省気象庁. “メソモデル・局値モデル”. 国土交通省気象庁.  
<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/whitep/1-3-6.html>, (参照 2021-02-01).
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構. “NEDO 局所風況マップ”. (国研) 新エネルギー・産業技術総合開発機構. <http://app8.infoc.nedo.go.jp/nedo/>, (参照 2021-02-01).
- 海上・港湾・航空技術研究所海上技術安全研究所. “日本近海の波と風のデータベース”. 海上・港湾・航空技術研究所海上技術安全研究所.  
[https://www.nmri.go.jp/wwjapan/namikaze\\_main.html](https://www.nmri.go.jp/wwjapan/namikaze_main.html), (参照 2021-02-01).
- 国土交通省海上保安庁海洋情報部海洋情報課/日本海洋データセンター. “海流統計表示”. 日本海洋データセンター.  
[https://jdoss1.jodc.go.jp/vpage/ocs\\_j.html](https://jdoss1.jodc.go.jp/vpage/ocs_j.html), (参照 2021-02-01).
- 水産研究・教育機構. “太平洋および我が国周辺の海況予測システム”. FRA-ROMS.  
<http://fm.dc.affrc.go.jp/fra-roms/public/>, (参照 2021-02-01).
- 国土交通省気象庁. “黒潮”. 国土交通省気象庁.  
<http://www.data.jma.go.jp/kaiyou/data/db/kaikyo/knowledge/kuroshio.html>, (参照 2021-02-01).
- フォーキャスト・オーシャン・プラス. “研究・開発協力”. JAMSTEC VENTURE Forecast Ocean Plus. <http://www.forecastocean.com/j/research.html>, (参照 2021-02-01).
- 国土交通省港湾局 全国港湾海洋波浪情報網. “リアルタイムナウファス”. 国土交通省港湾局 全国港湾海洋波浪情報網. <http://www.mlit.go.jp/kowan/nowphas/>, (参照 2021-02-01).
- 国土交通省. “GPS 波浪計による沖合波浪観測情報の公表について”. 国土交通省報道発表

## 第2章 海洋の風・波・流れ

資料. [http://www.mlit.go.jp/report/press/port05\\_hh\\_000005.html](http://www.mlit.go.jp/report/press/port05_hh_000005.html), (参照 2021-02-01).

- 石原孟, 山口敦. モンテカルロシミュレーションと MCP 法を用いた混合気候における極値風速の予測. 日本風工学会論文集, 2012, Vol.37, No.4.
- 構造工学委員会. 風力発電設備の動的解析と構造設計小委員会. 風力発電設備支持物構造設計指針・同解説 [2010年版]. 土木学会. 2010.
- 高田悦子, 諸星一信, 平石哲也, 永井紀彦, 竹村慎治. 我が国沿岸の波浪外力の分布 (海象外力検討調査). 国土交通省国土技術政策総合研究所資料第 88 号. 2003.
- Wilson, BW. Numerical prediction of ocean waves in the North Atlantic for December, 1959. Deutsche Hydrographische Zeitschrift, Volume 18, Issue 3, 1965, p.114-130.
- IEC. IEC 61400-3-1:Wind turbines-Part3. Design requirements for offshore wind turbines. IEC. 2019.
- 日本工業規格. JIS C1400-3. 風車-第 3 部 洋上風車の設計要件. 日本工業規格, 2014.
- Met Office. “How we measure wind”. Met Office.  
<http://www.metoffice.gov.uk/guide/weather/observations-guide/how-we-measure-wind>, (cited 2021-02-01).
- 国土交通省気象庁父島気象観測所. “地上気象観測”. 気象庁父島気象観測所.  
<http://www.jma-net.go.jp/chichijima/chijyou.html>, (参照 2021-02-01).
- 東京理科大学理工学部. “風向風速計”. 東京理科大学理工学部土木工学科水理研究室.  
<https://www.rs.noda.tus.ac.jp/hydrolab/equipment/parts/202.jpg>, (参照 2021-02-01).
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構. “「平成 26 年度 NEDO 新エネルギー成果報告会」発表資料”. 新エネルギー・産業技術総合開発機構. 2015-10-28.  
[https://www.nedo.go.jp/library/database\\_index.html](https://www.nedo.go.jp/library/database_index.html), (参照 2021-02-01).
- 三菱電機. “三菱電機 ドップラーライダーシステム”. 三菱電機.  
<http://www.mitsubishielectric.co.jp/lidar/index.html>, (参照 2021-02-01).
- 石田茂資, 二村正. 浮体式洋上風力発電の実海域計測について. 海上技術安全研究所報告. 第 16 巻第 2 号特集号. 2016. 153 p.
- アイオーテック. “波高・波向・風速計”. アイオーテック.  
<http://www.iotechnic.co.jp/products/wh14/wh-503-01.html>, (参照 2021-02-01).
- AXYS Technologies. “TRIAXYS Directional Wave Buoy”. AXYS Technologies.  
TRIAXYS-Directional-Wave-Buoy.pdf (axystechnologies.com) /, (cited 2021-02-01).
- ゼニライトブイ. “商品紹介”. ゼニライトブイ.  
<http://zenilite.co.jp/prod/new-gps.html>, (参照 2021-02-01).
- 千葉修, 伊藤浩之, 渥美泰彦. 海洋レーダー. 日本無線技報. No.48. 2005.
- 小牧裕幸, 山城徹, 城本一義, 仁科文子, 中村啓彦, 広瀬直毅. 海流発電適地選定のためのトカラ海況周辺海域における黒潮調査. 2013. 土木学会論文集 B3. Vol.69. No.2. p.I\_109-I\_113.
- 平野敏行. 沿岸の環境圏. フジ・テクノシステム, 1998, 1597p.
- 国土交通省海上保安庁水路部. 日本沿岸潮汐調和定数表. 海上保安庁, 1992, 267p.

## 第2章 海洋の風・波・流れ

- 沿岸海洋調査. “波浪・流況調査”. 沿岸海洋調査.  
<http://www.engan.jp/harou/kaiseki.html>, (参照 2021-02-01).
- 日本埋立浚渫協会. 平成28年度港湾技術報告会資料  
[https://www.umeshunkyo.or.jp/ronbun/h28\\_port\\_abstracts/4.pdf](https://www.umeshunkyo.or.jp/ronbun/h28_port_abstracts/4.pdf) (参照 2021-01-01)
- 川崎近海汽船. “オフショア支援船”. 川崎近海汽船.  
<https://www.kline.co.jp/service/energy/osv/index.html>, (参照 2021-02-01).
- 谷口友基, 石田茂資, 藤原敏文, 井上俊司. 静穏海象発現特性の解析および評価法に関する検討. 第25回海洋工学シンポジウム. 2015. p.549-556.
- 合田良實. 耐波工学 港湾・海岸構造物の耐波設計. 鹿島出版会, 2008, 430p.
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構. 風力発電導入ガイドブック. 第9版, 2008.
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構. 日本型風力発電ガイドライン、台風・乱流対策編.  
(独) 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 2008. 110p.
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構. NEDO 再生可能エネルギー技術白書. 2010.
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構. NEDO 再生可能エネルギー技術白書. 第2版,  
2013.

## 第3章 洋上風力発電システム

### 3 洋上風力発電システム

本章の目的は、洋上風力発電システムの工学的な成り立ちや開発の方向性を説明することである。

「3.1.1 風車の基礎知識」は、当システムを本質的に理解するための基礎であるが、数式をやや多用しているため、一般的な知識を得たい読者は数式を読み飛ばして頂いても差し支えない。

その後の各項では、まず、陸上から洋上へ、あるいは大型化の技術開発の歴史や、技術と経済（保険、ファイナンス等）を結ぶ製品認証（基準、規格等）を説明することによって、当分野の背景を理解した上で、各論に進む構成になっている。

その後の各節では、着床式と浮体式に分け、それぞれを設計技術、施工技術、維持管理技術の側面から、キーとなる技術群を俯瞰している。個々の読者が自らの専門分野に照らして課題設定の探索が行えるように、やや専門的な説明まで加えているが、適宜、興味のある項目から取捨選択して読んで頂いて差し支えない。

なお、陸上と比較した洋上風力発電のメリット・デメリットについては、「3.1.2 技術・開発の歴史」に記述した。また、海洋開発産業概論の2.2節にも、産業的な視点からのメリット・デメリットや開発動向等の記述があるので、適宜参照のこと。

#### 3.1 概説

##### 3.1.1 風車の基礎知識

ここでは、本章を理解する上で必要と思われる風車本体の基礎的事項を概説する。風車には様々な種類があるが、洋上で用いる可能性のある MW（メガワット）級の大型風車を対象を絞る。詳しくは、参考書（例えば牛山、2005、2013）が多数出ているので、適宜参考にされたい。

はじめに、風車各部の名称を図 3.1.1 に示す。ここで、ティルト角（tilt angle）はブレード（blade）が風力によって撓んだ時にタワーと接触しないためのものである。コーニング角（cornering angle）は、ロータ（rotor）がタワーより風上にあるアップウィンド（upwind）風車（「(3)ロータ位置」で説明）ではほとんどゼロであるが、ダウンウィンド（downwind）風車ではロータ面を風に正対させる効果を持つため、ある程度大きくする場合が多い。

### 第3章 洋上風力発電システム

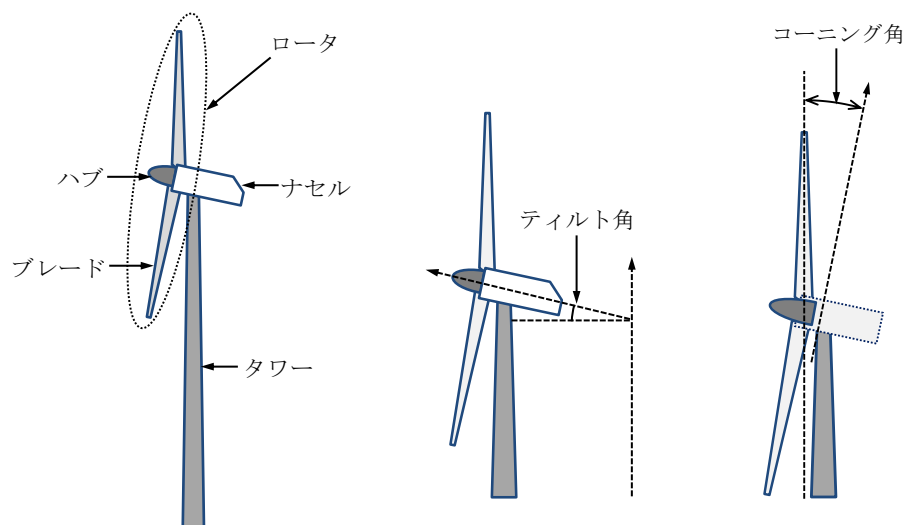


図 3.1.1 風車各部の名称

#### (1) 水平軸風車と垂直軸風車

風車には、回転軸が風向に対して平行な水平軸風車 (horizontal axis wind turbine) と垂直な垂直軸風車 (vertical axis wind turbine) がある (図 3.1.2)。現在、商用の大型風車は全て水平軸である。

垂直軸風車は、軸受けに大きな曲げモーメントが掛かる等、大型化には限界があると言われているが、風向に対する指向性がないという大きな長所があるため研究が続けられている。

一方、水平軸風車は、発電機や増速機を収納するための重量物であるナセル (nacelle) (図 3.1.3) を高所に設置する必要があることや、ヨー機構が必要という短所がある。ヨー機構とは、ローター面を風に正対させるためのもので、ナセルとタワーの接合部に設置されている。モータによって駆動させるため、重量とコストを増加させるが、これらの技術課題を克服し、水平軸風車が現在主流となっている。





図 3.1.2 水平軸風車と垂直軸風車  
(出典：三菱重工業ウェブサイト)

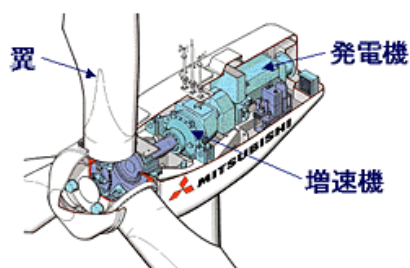


図 3.1.3 風車ナセルの構造  
(出典：三菱重工業ウェブサイト)

(2) ブレード数

詳しい理論は省略するが、風車の種類と性能の関係を図 3.1.4 に示す。図の横軸は周速比 (tip speed ratio) で、ブレード先端 (翼端) の周方向の速度と上流無限遠における風速  $U_\infty$  との比である。例えば、風速 12m/s、周速比 7 で回転している風車ではブレード先端の速度は 84m/s (300km/h 以上) にもなる。

縦軸は次式で定義されるパワー係数である。ここで、 $P$  [W] は得られるパワー、 $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] は空気の密度、 $A$  [m<sup>2</sup>] はロータ面積 (ロータ面のロータ軸に対する投影面積) である。図 3.1.4 中の「理現化された  $C_p$ 」とは、運動量理論による最大値 (16/27  $\approx$  0.593) であり、ベッツ (Betz) 係数として知られている。

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho A U_\infty^3} \tag{3.1.1}$$

### 第3章 洋上風力発電システム

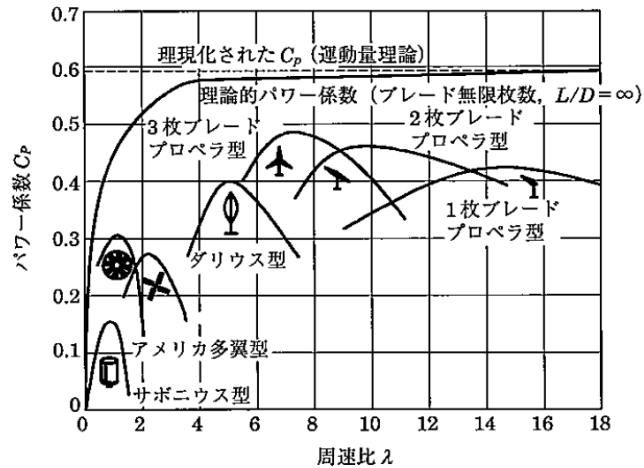


図 3.1.4 風車の種類と性能の関係  
(出典：牛山泉、2005)

この図から、2～3枚翼の水平軸風車の効率が良いことがわかる。効率のピーク値の他に、トルク特性、起動性、重量、耐久性、価格、バランス等から、3枚翼の水平軸風車が最も多く使われている。ただし、軽量化が可能な2枚翼風車を有望視する見方もあり、浮体式風車の実海域実験で採用された例がある。なお、同図はロータの設計により若干変動する。

#### (3) ロータ位置

図 3.1.5 に示すように、水平軸風車にはロータをタワーの風下側に配置するダウンウィンド型と風上側に配置するアップウィンド型とがある。

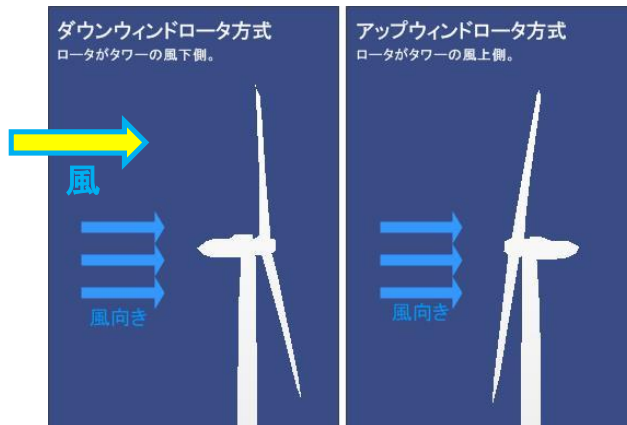


図 3.1.5 ダウンウィンド型ロータとアップウィンド型ロータ  
(出典：日立製作所ウェブサイトの図を一部改変)

アップウィンド型は、タワーに当たって乱れ、また一部減速した風を避けることができるため、発電性能とブレードの疲労寿命の点で利点があり、現在の主流となっている。一方、風向がロータ軸に対して斜めになった場合（ミスアラインメント (misalignment) と呼ぶ）、ロータ方向を補正する必要があり、大型風車ではモータを用いたヨー機構を持っている。ダウンウィンド型は、いわゆる風見鶏効果 (wind vane effect) によって風に正対し

### 第3章 洋上風力発電システム

ようとするが、アップウィンド型は風に対して横を向くモーメントが作用するため、大型のヨー機構が必要になる。

また、浮体式風力発電施設では、風によって浮体が風下に傾斜する（図 3.1.6）。その際、ダウンウィンド型ではティルト角がプラスに働いてミスアラインメントが小さくなるため、発電効率は高くなる。また、ヨーの安定性が高いことも支持浮体にとって有利であり、近年見直されている。



図 3.1.6 長崎県五島市沖の浮体式風車  
(出典：海洋エネルギー資源利用推進機構、2016)

#### (4) パワーカーブとブレードピッチ制御

2章で説明したように、風車の出力は風速の3乗に比例する。風速が低い範囲では、この関係に従って発電すれば良いが、発電機の容量や使用する機器や構造の耐力の制限から、出力と回転速度に上限を設ける必要がある。そこで、風速と出力の関係は図 3.1.7 のような曲線となるように制御される。大型風車では、高風速では風を逃がすようにブレードの角度（ブレードピッチ角）を制御する。多くの風車では風速 25m/s 程度がパワーカーブの上限（カットアウト風速）となっており、これ以上の風速ではブレードを完全に風に立てて、安全な状態を保つ。

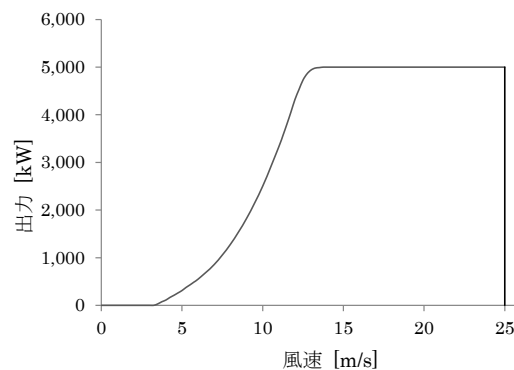


図 3.1.7 パワーカーブの例（定格出力 5MW）

### 第3章 洋上風力発電システム

#### (5) 風車荷重・性能の計算法

風車単体の荷重・性能評価には、翼素運動量理論（BEM：Blade Element Momentum theory）と数値流体力学（CFD：Computational Fluid Dynamics）が一般に用いられる。

##### ① 翼素運動量理論

翼素運動量理論は、翼素理論と運動量理論を組み合わせたものである。翼素理論はブレードを回転半径方向の翼素に分割し、各翼素に作用する力を2次的に求め、適宜、翼端ならびに翼根部に3次元性を考慮した補正を行い、ブレードの長さ方向に積分することでスラスト（thrust）とトルク（torque）を求めるものである。一方、運動量理論はロータの回転面を仮想的な作動円盤（actuator disk）とみなし、作動円盤の前後の流体の速度や圧力に着目して、スラストやトルクを求めるものである。これらを組み合わせることで簡便にかつ実用的な精度でロータ特性を求めることができるため、広く一般に用いられている。

以下に翼素運動量理論の概要を示す。

##### a) 運動量理論

運動量理論とは、風車ロータ前後の風の運動量変化と、風車に取り出すエネルギーが等しいと仮定してロータの理想的な効率等を求める理論である。 $A$ は断面積、 $P$ は圧力、 $V$ は速度を表す。図3.1.8は運動量理論に用いる風速等のパラメータの概念図である。ここで風車ロータの受風面は作動円盤と呼ばれる。流線は作動円盤の外周を通過する空気の前後の軌跡を示しており、流線に囲まれた領域を流管（stream tube）と呼ぶ。

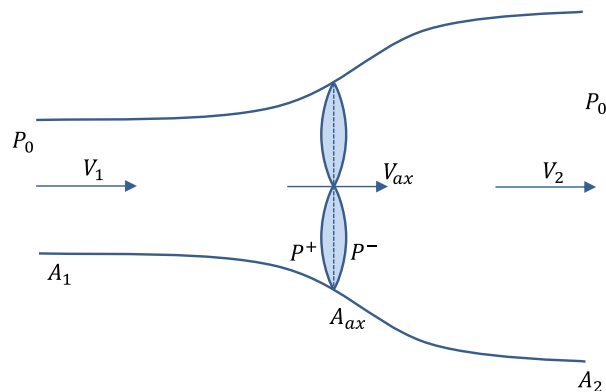


図 3.1.8 作動円盤に流入する流れのイメージ

上図に示される流管を考えると質量保存の法則から次の関係が得られる。

$$\rho A_1 V_1 = \rho A V_{ax} = \rho A_2 V_2 \quad (3.1.2)$$

### 第3章 洋上風力発電システム

ロータに対するスラスト  $T$  は、流出する流れと流入する流れの運動量の変化により与えられ、先の質量保存の関係から変形して次式のように求めることができる。

$$T = \rho A_1 V_1^2 - \rho A_2 V_2^2 \quad (3.1.3)$$

$$= \rho A V_{ax} (V_1 - V_2) \quad (3.1.4)$$

また、スラスト  $T$  はロータ面にわたる圧力差の結果として表すこともできる。

$$T = (P^+ - P^-) A \quad (3.1.5)$$

一方、圧力はベルヌーイ (Bernoulli) の方程式を用いて以下のように表現することができる。

$$P_0 + \frac{1}{2} \rho V_1^2 = P^+ + \frac{1}{2} \rho V_{ax}^2 \quad (3.1.6)$$

$$P^- + \frac{1}{2} \rho V_{ax}^2 = P_0 + \frac{1}{2} \rho V_2^2 \quad (3.1.7)$$

上記の式より圧力差に関係する式が得られる。

$$P^+ - P^- = \frac{1}{2} \rho (V_1^2 - V_2^2) \quad (3.1.8)$$

したがって、スラストは次式のようになる。

$$T = \frac{1}{2} \rho A (V_1^2 - V_2^2) \quad (3.1.9)$$

スラストに関する2種類の式が等値であることから、次の関係が得られる。

$$V_{ax} = \frac{1}{2} (V_1 + V_2) \quad (3.1.10)$$

ロータが抽出するパワー  $P$  は、ロータ面を通過する流体の運動量の変化に等しいことから、スラストと流速の積として、

$$P = \frac{1}{2} \rho A V_{ax} (V_1^2 - V_2^2) \quad (3.1.11)$$

ここで、 $\rho A V_{ax}$  は単位時間にロータを通過する質量である。ここで次式によって誘導係数 (induction factor、速度低減率)  $a$  を導入する。

$$V_{ax} = V_1(1-a) \quad (3.1.12)$$

誘導係数を用いると、風車後流風速、スラスト、パワーは以下のように表現できる。

$$V_2 = V_1(1-2a) \quad (3.1.13)$$

$$T = 4a(1-a)\frac{1}{2}\rho AV_1^2 \quad (3.1.14)$$

$$P = 4a(1-a)^2\frac{1}{2}\rho AV_1^3 \quad (3.1.15)$$

$P$ の最大値は、 $dp/da=0$ によって与えられ、 $a=1/3$ のとき最大となる。 $a=1/3$ を式(3.1.14)に導入することで $P$ の最大値を得る。

$$P_{\max} = \frac{16}{27} \times \frac{1}{2} \rho AV_1^3 \quad (3.1.16)$$

この係数(=16/27)はベッツ係数と呼ばれ、運動量理論における最大効率を表す。

#### b)翼素理論

上記のように、運動量理論ではスラストやパワーを誘導係数(あるいはブレード面や後流の風速)により計算できる。これらの結果を以降に示す翼素理論と組み合わせることにより、風車の空気力学的特性を求めることができる。

翼素理論は、ブレードを長さ方向に分割し、各2次元微小翼素に作用する力を計算し、これをブレードの長さ方向にわたって積分すること、そしてブレード数を掛け合わせて、トルクおよびスラストを求めるのがその手順である。

翼素に作用する風速と力を図3.1.9に示す。翼素は、自らの接線速度 $\omega r$ と流入速度 $V(1-a)$ の合成風 $W$ を仰角 $\alpha$ で受けて空気力 $dF$ を発生する。なお、ここからは風上遠方の流速 $V_1$ を単に $V$ と表記する。

簡単のため、ここでは各翼素は同一平面上を運動する、すなわちコーニング角(図3.1.1参照)はゼロと仮定する。翼素断面の揚力 $dL$ と抗力 $dD$ に対し次式が用いられる。なお、 $\omega$ はロータの回転角速度、 $C_L$ は揚力係数、 $C_D$ は抗力係数である。

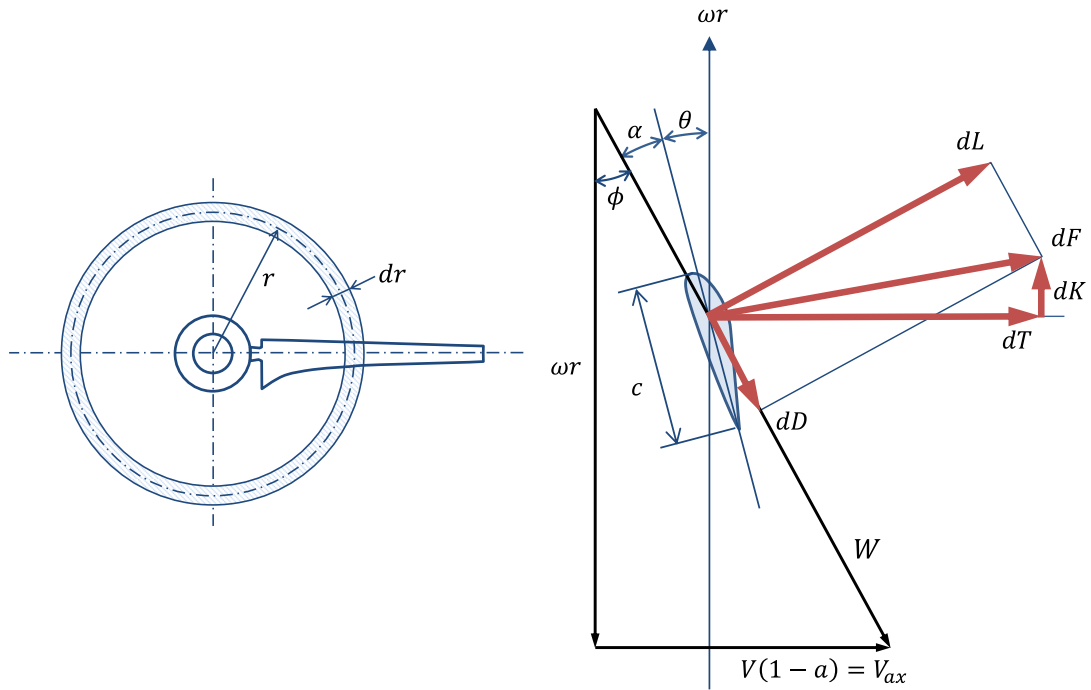


図 3.1.9 翼素に作用する風速と力

$$dL = C_L \frac{1}{2} \rho W^2 c dr \quad (3.1.17)$$

$$dD = C_D \frac{1}{2} \rho W^2 c dr \quad (3.1.18)$$

翼素に作用するスラスト  $dT$  とトルク  $dQ$  は、

$$dT = dL \cos \phi + dD \sin \phi \quad (3.1.19)$$

$$dQ = dK \cdot r = (dL \sin \phi - dD \cos \phi) r \quad (3.1.20)$$

式 (3.1.18) を用い、ロータが  $B$  枚のブレードを有すると仮定するとスラストとトルクの式は、次のようになる。

$$dT = B \frac{1}{2} \rho W^2 (C_L \cos \phi + C_D \sin \phi) c dr \quad (3.1.21)$$

$$dQ = B \frac{1}{2} \rho W^2 (C_L \sin \phi - C_D \cos \phi) c r dr \quad (3.1.22)$$

c) 翼素理論と運動量理論の結合

翼素理論による結果と運動量理論による結果とを結びつけるため、相対風速  $W$  の式を導入する。これは図 3.1.9 より幾何学的に求められる。

$$W = \frac{(1-a)V}{\sin \phi} = \frac{\omega r}{\cos \phi} \quad (3.1.23)$$

$$\tan \phi = \frac{(1-a)V}{\omega r} = \frac{1-a}{\lambda_r} \quad (3.1.24)$$

ただし、 $\lambda_r$  は半径  $r$  の翼素における局所的な周速比である。

ここで局所ソリディティ (solidity) を次式により導入する。ソリディティとは、ブレードの掃過面積に対するブレードの投影面積の比であり、風車の性能を表す指標の一つである。次式は、半径  $r$  の位置の円環 (図 3.1.9 左図) にブレードが存在する比率である。

$$\sigma = \frac{Bc}{2\pi r} \quad (3.1.25)$$

以上より、翼素理論の結果は次のように変形される。

$$dT = (1-a)^2 \frac{\sigma C_L \cos \phi}{\sin^2 \phi} \left(1 + \frac{C_D}{C_L} \tan \phi\right) \frac{1}{2} \rho V^2 2\pi r dr \quad (3.1.26)$$

$$dQ = \frac{\sigma C_L \sin \phi}{\cos^2 \phi} \left(1 - \frac{C_D}{C_L} \frac{1}{\tan \phi}\right) \frac{1}{2} \rho \omega^2 r^2 2\pi r dr \quad (3.1.27)$$

運動量理論によるスラストの式 (3.1.13) を、半径  $r$  の位置の円環のみに適用して  $dT$  の式とし、翼素理論による式 (3.1.25) と等値とすることで、次式が導かれる。

$$\frac{4a}{1-a} = \sigma C_L \frac{\cos \phi}{\sin^2 \phi} \left(1 + \frac{C_D}{C_L} \tan \phi\right) \quad (3.1.28)$$

風車の最適な稼動状態では、揚抗比 (揚力/抗力) が 100 倍に達することもあるため、抗力の項を無視すると、以下の式が得られる。

$$\frac{4a}{1-a} = \sigma C_L \frac{\cos \phi}{\sin^2 \phi} \quad (3.1.29)$$

以上より、運動量理論と翼素理論が関係付けられた。 $\phi$  は  $a$  の関数であり、また仰角の関数である  $C_L$  と  $C_D$  も  $a$  によって変化する。したがって、これらの式を数値的に解き、その結果を用いて風車ロータの特性を求めることになる。

このように、翼素運動量理論で想定する 2 次元翼形状の揚力係数  $C_L$ 、抗力係数  $C_D$  を仰角の関数として求めておく必要がある。これらは CFD 計算、風洞試験結果、文献データ等から求めることができる。例として、2 次元翼のデータサイト Airfoil Tools



### 第3章 洋上風力発電システム

(<http://www.airfoiltools.com/>)により求められた、NACA0012翼の特性を図 3.1.10 に示す。

なお、ここでは省略したが、実際にはロータ回転の反動として風車後流は回転しており、運動エネルギーの損失として扱う必要がある。これは、図 3.1.9 の仰角  $\alpha$  が小さくなるような誘導速度 (induced velocity) を発生する。また、翼端損失 (blade tip loss、3次元影響) や誘導速度が高い場合の経験式を加えることで、より精度の高い解を得ているのが実情である。

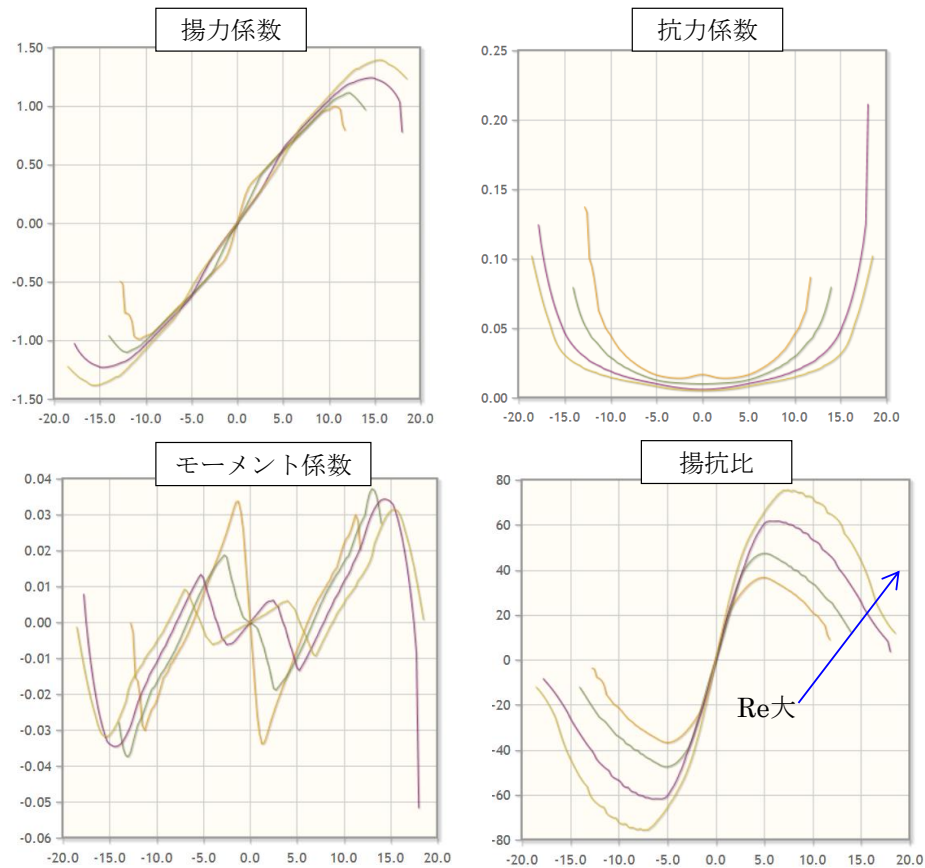


図 3.1.10 迎角に対する 2次元翼の性能  
(レイノルズ数  $Re=1.0 \times 10^5$ 、 $2.0 \times 10^5$ 、 $5.0 \times 10^5$ 、 $1.0 \times 10^6$ )  
(出典: Airfoil Tools ウェブサイトを用いて出力)

#### ② 3次元 CFD

3次元 CFD を用いれば、これらの理論を用いずにロータ特性を算出することができる。また、複雑な形状周りの流場を扱うことができ、ロータを構成するブレード周りの流れでは翼端の3次元性の影響を直接考慮できる等のメリットがある。一方、計算機の負荷が高く、解を得られるまでに時間がかかることになる。

CFD で用いるのは、流体に関する運動方程式であるナビエ・ストークス (Navier-Stokes) 方程式 (NS 方程式) である。2階非線型偏微分方程式であり、解析解は存在しないため、数値的に解くことになる。

圧縮性流れの NS 方程式を以下に示す。

$$\frac{D\mathbf{v}}{Dt} = F - \frac{1}{\rho} \text{grad } p + \nu \text{grad } \theta + \nu \Delta \mathbf{v}$$

$$\theta = \text{div} \mathbf{v} \quad (3.1.30)$$

ここで、 $\mathbf{v}$  は速度ベクトル、 $t$  は時間、 $F$  は単位質量に働く外力ベクトル、 $\rho$  は密度、 $p$  は圧力、 $\nu$  は動粘性係数である。なお、潮流・海流発電のように流体の圧縮性を無視できる場合は、右辺第3項を省略することができる。

計算・解析作業は、以下の手順で行われる。

(1) 前処理

- ・モデルデータ作成

対象物体の形状を再現した 3D モデルを作成する。

- ・計算格子生成

対象物体から十分遠方まで解析領域を離散化する。なお、粒子法のように計算格子を用いない手法もある。

(2) 解析

(3) 後処理

- ・数値出力

- ・可視化

解析結果の妥当性判断や現象把握のため、流速、圧力、渦度等の分布を等高線やコンター図に描画する。

計算格子生成において、解析対象領域は、対象物体の局所的な影響が及ぶ範囲よりも大きくする必要があり。一方で、領域を大きくして格子点（メッシュ数）が増加すれば計算時間が増加するため、一部を細かくするといった工夫がされる。格子を細かくする部分は、流速・流向の変化が大きい領域である。格子の大きさ・配置はレイノルズ数（Reynolds number）、境界層厚さ、乱流のスケール等を考慮して決められる。また、時間的に一定でない現象を扱う非定常解析の場合は、適切な計算時間間隔を選ぶことも重要である。

計算格子の例を図 3.1.11 に示す。(a)はロータ周囲の領域であり、このケースではロータとともに回転する格子を用いている。(b)はブレード断面周りの格子であり、ブレード近傍を密な配置にしている。解析例を図 3.1.12 に示す。

3次元 CFD は有用であるが、現在の数値流体力学には流れを完全に再現できないという欠点がある。このため、3次元 CFD を実際に使用する場合には実験結果と比較検証することが一般的である。

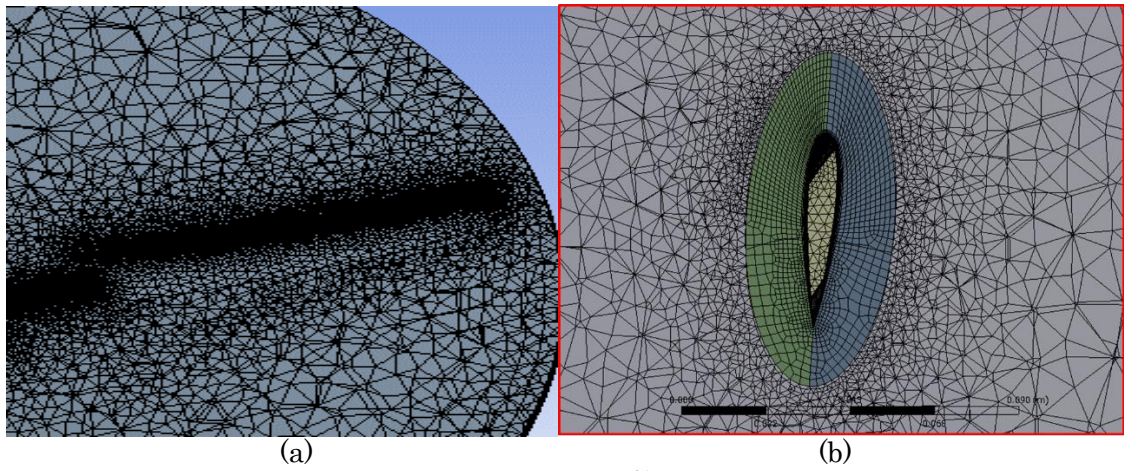


図 3.1.11 CFD の計算格子の例  
(海流発電装置計算用 CFD メッシュ、Ansys Fluent を用いて作成)

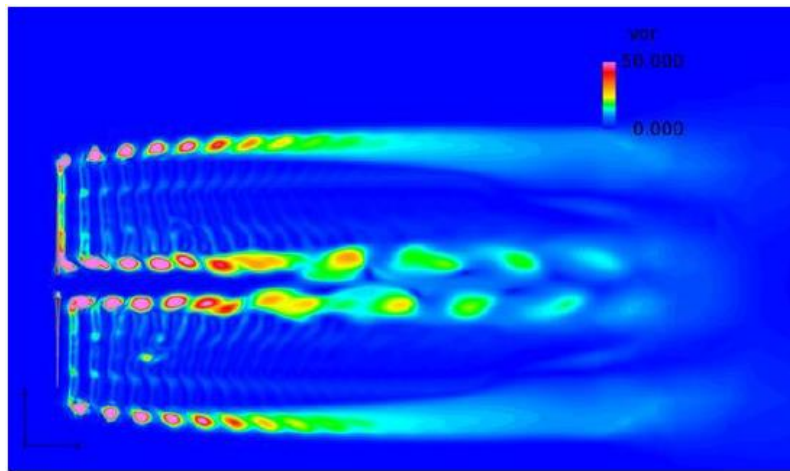


図 3.1.12 CFD の解析例 (風車後方の渦度分布のコンター図)  
(出典：池田大夢等、2013)

### 第3章 洋上風力発電システム

#### 3.1.2 技術・開発の歴史

##### (1) 風車の大型化

大型風車のエネルギー変換効率は40%を超えており非常に高いが、風のエネルギー密度そのものはそれ程大きいものではない。例えば、我が国沿岸で風況の非常に良い海域の平均風速は8m/s程度であるが、エネルギー密度は約0.3kW/m<sup>2</sup>である。出力を増大させるためにはロータ面積を大きくする必要がある。したがって、風力発電装置の開発の歴史は大型化の歴史であるとも言える。図3.1.13に示すように2010年ではロータ直径が90mであったが、2019年にはほぼ倍の直径になっており、2030年には230~250mになると想定されている。最大の商用機は定格出力10MW（2019年現在）に達しており（MHI-Vestas社、Siemens社）、さらなる大型風車が開発途上である。

構造物を相似形状で寸法を $a$ 倍にすると、面積は $a^2$ に、体積（質量）は $a^3$ に比例する。風車で取得できるエネルギーはロータ面積に比例するため $a^2$ に比例する。一方、製造コストが体積（材料費）に比例するとすれば $a^3$ に比例する（2乗3乗則）。したがって、大型化によって経済性は悪化することになる。しかし、設置工事やO&M（Operation & Maintenance）等のコスト低減や、高空の速い風速の利用によって、十分なスケールメリットがあるとされている。特に洋上では海上作業にコストが掛かることから、このような大型風車は洋上設置を強く意識したものとなっている。

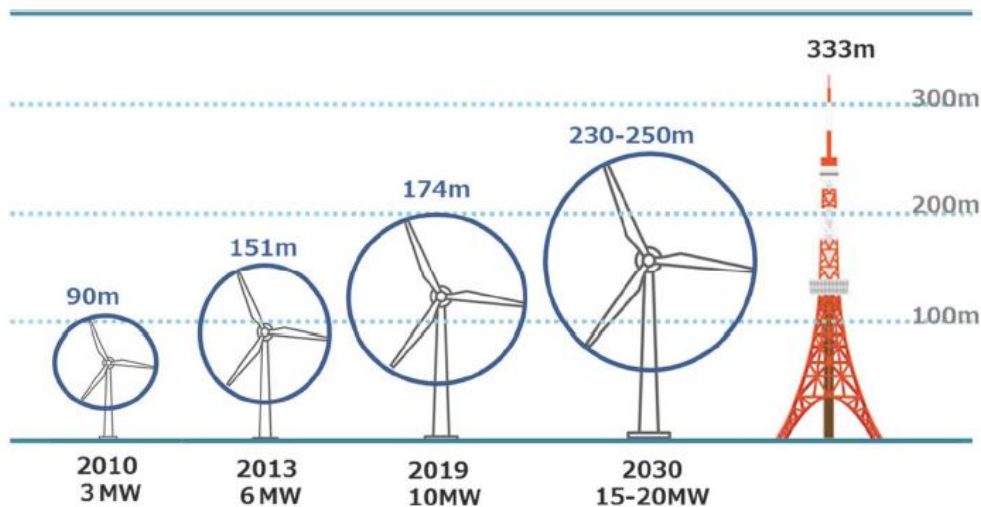


図 3.1.13 風車の大型化の流れ  
(出典：経済産業省、国土交通省、2020)

##### (2) 洋上展開の利点と課題

近年では世界的に洋上風力発電施設の開発が盛んに行われている。

図3.1.14に示すように、洋上風力発電施設の支持構造は、海底に基礎を置く着床式と、係留された浮体に基礎を置く浮体式に分けられる。着床式は経済的・技術的に水深50m~60mが限界とされており、それより深い海域では浮体式を採用することとなる。我が国は遠浅の海岸が少ないため、浮体式の発電ポテンシャルが大きい。

### 第3章 洋上風力発電システム

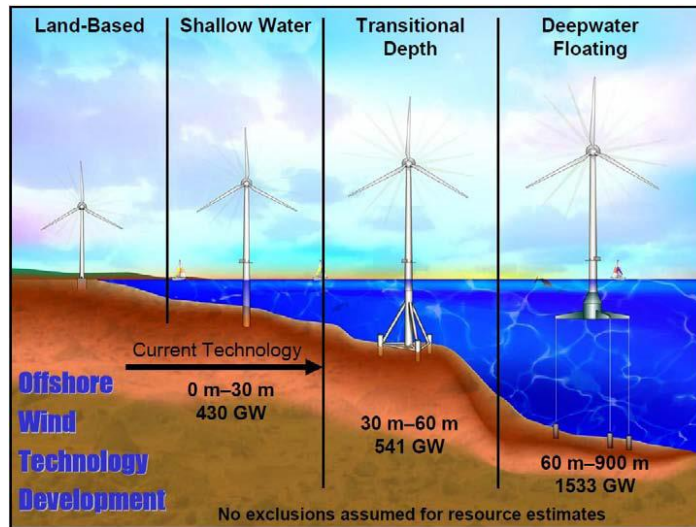


図 3.1.14 洋上風車の支持構造  
(出典：National Renewable Energy Laboratory、2007)

着床式は、波・流れの影響を受けることや洋上における施工性、アクセス性の問題を除けば陸上設置型と大きな差はなく、欧州を中心として既に実用化されている。現在は大型化等、経済性向上のための取り組みが行われている。一方、浮体式は低コストで揺れにくい浮体の開発が盛んに行われ、大型風車を搭載した実証実験が複数進行中である。また、世界初の商用運転が長崎県五島市沖において 2016 年 3 月に始まった段階である。

風力発電施設を洋上に設置する主な利点として、以下が挙げられる。

- ① 風況が良い  
陸上に比較して平均風速が大きい。また、風の乱れが小さいためブレード等の疲労が少ない。
- ② 設置可能面積が広い  
我が国は海岸線の長さ、排他的経済水域（EEZ: Exclusive Economic Zone）ともに世界第 6 位であり、広い設置可能面積がある。
- ③ 大型化しやすい  
大型風車では、ナセル重量が数百トン、ロータ直径が 100m 以上になる。陸上（特に山岳地帯）では運搬・設置に困難が伴うが、洋上では大型作業船の利用が可能である。
- ④ 景観や騒音の問題が少ない

一方、解決すべき主な課題として、以下が挙げられる。

- ① 建造・設置コストの増加  
波と流れによる外力や腐食環境（海水）に耐える支持構造物が必要である。また、洋上での設置作業にも大型船起重機船や専用船が必要になる。

### 第3章 洋上風力発電システム

#### ② 運用・保守コストの増加

アクセス性の問題から、信頼性の向上や運用・保守の効率化が必要になる。

#### ③ 浮体支持構造物の動揺

安全性と発電効率の両面から、浮体式では動揺を小さくすることが必要になる。

また、浮体の動揺によって風車へ流入する風が変化するため、浮体の挙動と風車の挙動の連成を考慮する必要がある。

#### ④ 漁業権、船舶航路等、既存の海域利用者との調整が必要

以上に述べたように、洋上風力発電施設は大きな発電量を見込むことができるが、安全性を確保しつつ各種コストを低減するための技術開発が必要になる。以下では、洋上風力発電に特有な技術的事項を中心に解説する。

### (3) 着床式支持構造

着床式支持構造の主な形式を図 3.1.15 に示す。詳細は 3.2 節を参照のこと。

着床式の支持構造は、海底に打ち込んだ 1 本の杭を用いるモノパイル (monopile) 式基礎が早くから、また最も多く使われている。モノパイル式基礎は構造的にシンプルであるが、大きな曲げモーメントを鋼製の杭 1 本で支持するため、大水深や大型風車には不向きである。

重力式基礎は、コンクリート製のケーソン (caisson) など、重量のあるベースを海底に置いて基礎構造とするものであり、長期間にわたって沈下しないしっかりした海底地盤に適している。

ジャケット (jacket) 式基礎は、複数のレグ (柱) から櫓を組む形式であり、比較的大水深まで適用可能である。この他にも、派生した様々な型式が考案されている。

なお、風車本体については、冷却系の密閉化、タワーの塗装、ブレードの表面処理等の塩害対策が取られているが、陸上風車と本質的な違いはない。

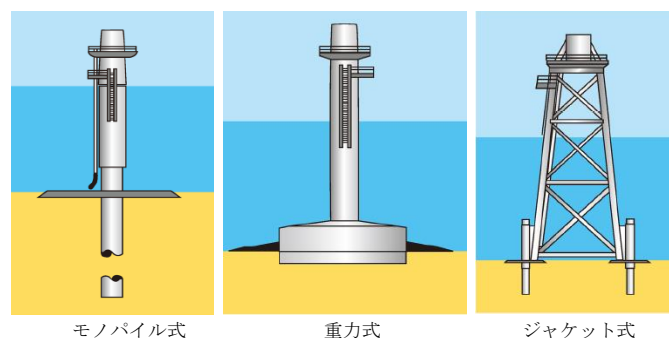


図 3.1.15 着床式風車の支持構造  
(出典：NEDO、2013 による図を一部改変)

洋上風力発電は、1991 年にデンマーク領バルト海に建設された着床式の Vindeby ウィンドファーム (450kW×11 基) が第 1 号と言われている。その後欧州では、経済的に着床式が可能とされる水深 50m~60m 以浅の海域でウィンドファームが多数設置された。例え

### 第3章 洋上風力発電システム

ば図 3.1.16 に示す Horns Rev ウィンドファーム（デンマーク沖、北海、2MW×80 基、2002 年が有名である。その後、さらに規模の大きいウィンドファームが多数建設・計画され(表 3.1.1)、最大のウィンドファームは英国 London Array 洋上サイト(630MW、3.6MW×175 基、海域面積 100km<sup>2</sup>) である。



図 3.1.16 Horns Rev ウィンドファーム  
(出典：Rathmann, O. et al.)

表 3.1.1 世界の洋上風力発電所（総出力順）

No.	発電所	国	発電出力(MW) (定格出力×基数)	運転開始 時期
1	London Array	UK	630 (3.6×175)	2013
2	Gwynt y Môr	UK	576 (3.6×160)	2015
3	Greater Gabbard	UK	504 (3.6×140)	2013
4	BARD Offshore 1	Germany	400 (5.0×80)	2013
5	Anholt	Denmark	400 (3.6×111)	2013
6	West of Duddon Sands	UK	389 (3.6×108)	2014
7	Walney(1-2)	UK	367 (3.6×102)	2011(1) 2012(2)
8	Thorntonbank (1-3)	Belgium	325 (5.0×6) (6.15×48)	2009(1) 2013(2) 2013(3)
9	Sheringham Shoal	UK	317 (3.6×88)	2012
10	Thanet	UK	300 (3.0×100)	2010

(出典：海津信廣、2015)

我が国では、サミットウィンドパワー酒田発電所(2MW×8 基、うち洋上は 5 基、酒田北港水路部内、水深 4m)と、北海道瀬棚町洋上風力発電所「風海鳥」(かざみどり、600kW×2 基、瀬棚港内)が、ともに 2004 年に運転を開始した。これらは、港湾内の静穏海域に設置されたものである。

近年では、外洋に面した海域にも展開されており、ウィンド・パワーかみす第 1 洋上風力発電所(2MW×7 基、2010 年稼動開始)、同第 2 洋上風力発電所(2MW×8 基、2013 年稼動開始)(図 3.1.17 参照)が運転中である。また、100MW 規模のウィンドファーム

### 第3章 洋上風力発電システム

が茨城県鹿島港沖および秋田県能代港沖で計画されている。なお、概ね目安として、100MWの発電量は一般家庭約6万世帯分の消費電力量相当である。

また、我が国の環境条件に適した洋上風力発電施設の開発に資するため、NEDOによる実証事業が、千葉県銚子沖（重力式、離岸距離3km、水深12m、2.4MW風車、2010年稼動開始）（図3.1.18）および北九州市響灘（ジャケツト式、離岸距離1.4km、水深14m、2MW風車、2011年稼動開始）（図3.1.19）において実施中である。両プロジェクトでは、風速の鉛直分布等、観測タワーによる詳細な風況観測が同時に実施されている。



図 3.1.17 ウィンド・パワーかみす第2洋上風力発電所  
（出典：ウィンド・パワーウェブサイト）



図 3.1.18 銚子沖風力発電施設（重力式）  
（出典：NEDO、2014）



図 3.1.19 北九州市沖風力発電施設（ジャケツト式）  
（出典：NEDO、2014）



### 第3章 洋上風力発電システム

#### (4) 浮体式支持構造

資源ポテンシャルの大きさや陸上適地の限界から、近年では浮体式の研究開発が盛んに行われている。浮体式支持構造の主な形式を図 3.1.20 に示す。この他にも様々な形式が提案されているが、詳細は 3.3 節を参照のこと。

セミサブ (semi-submersible) 型は、水面を貫通する複数のコラムとコラムを連結する部材 (ブレース) で構成される浮体構造物である。係留はカテナリ (catenary) 係留を用いる場合が多い。風車を岸壁等の比較的静穏な海域で搭載することができるが、構造が複雑なため高価になる。

スパー (spar) 型は、円筒型のシンプルな構造のため製造コストを抑えることができる。係留はカテナリ係留を用いる場合が多い。一方、喫水が深い浅い海域には設置することができない。また、工場から搬出時に横倒しするため、建て起こし作業と風車の搭載作業を洋上で行う必要がある。

TLP (Tension Leg Platform、緊張係留式) 型は、強制的に半潜水させた浮体構造物と海底に打設した基礎杭とをテンドンと呼ばれる鋼管や鋼線で接続し、浮力によって生じる緊張力を利用して係留される構造物である。垂直方向に常時強い力がかかるため、動揺を小さな範囲にとどめることができる。一方、海底地震の場合でも基礎杭が抜けないう、十分な耐力を持たせる必要がある。

以上の形式は、海底石油・ガス開発用のプラットフォームで実績のあるコンセプトであり、水面貫通部を小さくすることで波浪外力を受けにくくしている。

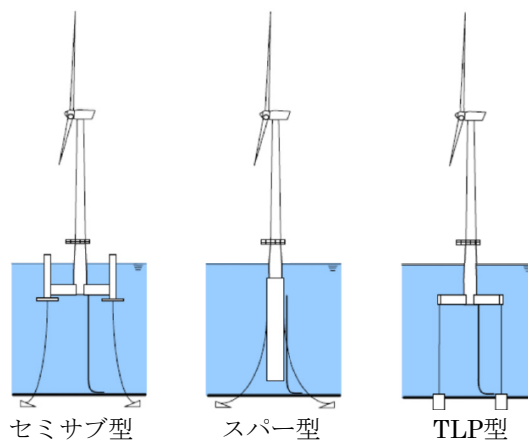


図 3.1.20 浮体式風車の支持構造  
(出典：鈴木英之、2012)

実機スケールの浮体式洋上風力発電施設では図 3.1.21 に示す、2007 年にイタリアの洋上沖 21km に設置された BlueH (BlueH Engineering 社、TLP 型、80kW 風車、水深 113m) が世界初とされる。続いて、図 3.1.22 に示す大型風車を搭載した Hywind (Statoil 社、スパー型、2.3MW 風車、ノルウェー沖、水深 200m) が 2009 年に設置され、世界の注目を集めた。その後、図 3.1.23 に示す Windfloat (Principal Power 社、セミサブ型、2MW 風車、ポルトガル沖) が 5 年間実証実験されるなど、様々なコンセプトが開発されている。

### 第3章 洋上風力発電システム



図 3.1.21 BlueH

(出典：BlueH Engineering 社ウェブサイト)



図 3.1.22 Hywind

(出典：Equinor 社ウェブサイト)



図 3.1.23 WindFloat

(出典：Principal Power 社ウェブサイト)

我が国では、環境省による浮体式洋上風力発電実証事業（2010～2015年度）が実施された。コスト低減のため下部をプレストレスコンクリート（PC：Pre-stressed Concrete）構造、上部を鋼構造としたハイブリッド・スパー型浮体が開発され、長崎県五島市梶島沖（離岸距離 1km、水深 98m）で実証研究が行われた。

まず、100kW 風車を搭載した小規模試験機（浮体サイズは 1/2）が設置され、続いて 2MW 実証機（排水量 3,400t、喫水 76m）が設置された（図 3.1.24）。風車は、風による浮体傾斜の影響を低減できるダウンウィンド型を採用している。

この施設は、我が国で初めて陸上の電気系統に接続された浮体式洋上風車であり、2016年3月に同市福江島の沖合 5km に移設され、商業運転を行う世界初の浮体式風力発電所となった。

また、経済産業省による福島復興・浮体式洋上ウィンドファーム実証研究事業が 2011 年

### 第3章 洋上風力発電システム

度から開始された。この事業では、浮体式風力発電施設 3 基と浮体式変電所（サブステーション、25MVA）1 基から構成される世界初の浮体式ウィンドファームを、福島県沖 20km で運用中である。浮体は、喫水を小さくし波浪による揺れを抑えるアドバンスト・スパー型、コスト低減を図ったコンパクトセミサブ型や V 字型セミサブを採用し、浮体技術の検証を行っている（図 3.1.25）。

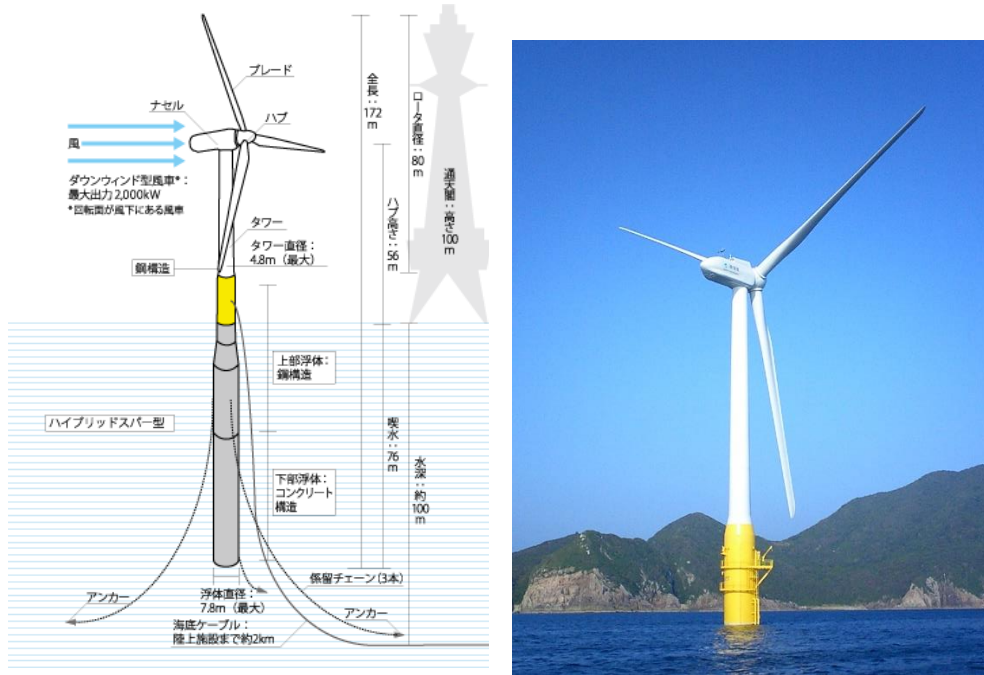


図 3.1.24 環境省実証事業 2MW 実証機  
 (左：出典：環境省浮体式洋上風力発電実証事業 GOTO FOWT ウェブサイト)  
 (右：提供：海上技術安全研究所)

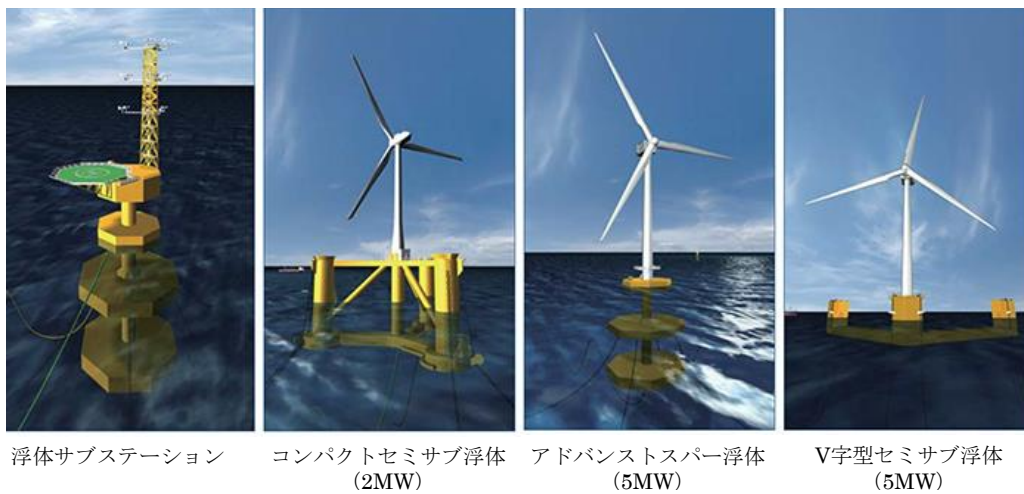


図 3.1.25 福島浮体式洋上ウィンドファームの構成  
 (出典：福島復興・浮体式洋上ウィンドファーム実証研究事業ウェブサイトの図を一部改変)

## 第3章 洋上風力発電システム

### 3.1.3 基準・規格と認証

#### (1) 全体動向

標準的な洋上風力発電にかかわる導入の流れを基準、規格等を例示しながら図 3.1.26 に示す。

基準・規格や安全ガイドラインは、洋上風力発電の技術的發展に合わせ適時に見直していくことが重要である。事実、国際電気標準会議などの国際機関において、洋上風力発電の規格等について不断の見直しが行われている。

一般的に、基準などを作成する際には、①人命や環境を保護するといった社会的安全性と、②建築物が沈没等により失われることで財産を失うことを防ぐ、といった財産の保全性の両面から議論することになる。

社会的安全性の観点と財産の保全性の観定のいずれに重きを置くかは、その基準・規格やガイドラインの性格・対象・目的によっても異なり、国が定める基準は社会的安全性の観点が重視される傾向にある一方、民間の経済活動の中では財産の保全性の観点が非常に重要となる。

具体的には洋上風車の事例ではないが、例えば米国では、法令で定める建築物の防火基準とは別に、保険会社が定める HPR 基準 (Highly Protected Risks standard) というものがあり、この基準を遵守することを前提に引き受けられる保険は、通常の火災保険に比べて保険料率が大幅に減免される。この HPR 基準は、高度な防火技術による財産保全を目的として発達したと言われており、財産の保全性の観点は実際の経済活動の中では、保険などにも直結しうる重要な点であることが伺える。

洋上風車の場合には居住用の構造物ではなく、人口密集地とも隣接せず、環境汚染の危険性も比較的小さいため、そもそも社会的安全性は比較的高いと考えられている。このため、洋上風車の基準・規格やガイドラインを作成するに当たっては、その性格や目的にもよるが、財産の保全性の観点からの検討が相対的に高くなりがちであろう。

ここで、財産の保全性の観点から考えると、一律の安全率を定め、それを満足するような安全対策を決定していくのではなく、財産の価値とその財産の損失確率の積で定義される経済的リスクが許容範囲内に収まるように対策を講じていく方が合理的である。特に、洋上風車のように社会的安全性がそもそも比較的高く、また、プロジェクトが大規模になりがちな場合は、個々の洋上風車が安全率を厳密に満足するような設計手法ではなく、プロジェクト全体の経済的リスクを許容範囲内に収めていくリスクベースの設計手法の方が、適していることが多いと考えられる。

他方、経済的リスクベースの設計手法は必ずしも汎用的な手順が確立しているわけではないことから、プロジェクトが小規模となる場合は、個々の洋上風車が安全率を満足するように設計していく方が簡便な場合もある。

このように、基準・規格やガイドラインは、その性格・対象・目的によって内容が大きく変わりうることから、設計者、研究者、認証機関 (certification authority) の関係者らは、基準・規格やガイドラインの策定等に関わる場合には、その基準・規格やガイドラインが目指す安全性が純然たる社会的安全性なのか、それとも財産保全としての安全性なの

### 第3章 洋上風力発電システム

か、あるいはその両者なのか、またどちらに重きを置くべきなのかといったことを明確にして対応していくことが必要である。これは、基準・規格やガイドラインを運用していく上でも同様である。

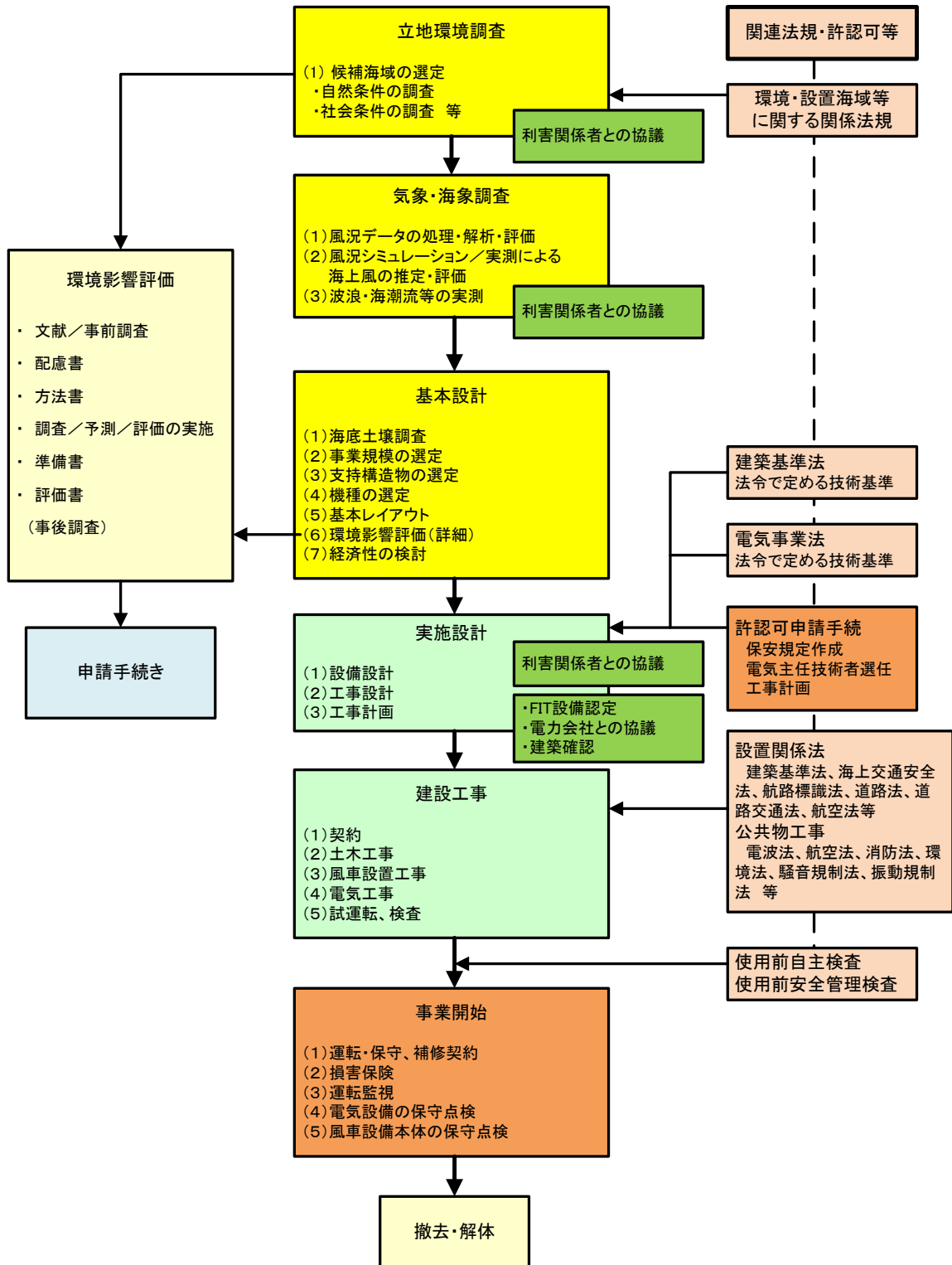


図 3.1.26 洋上風力発電にかかわる導入の流れ  
(出典：NEDO、2015 による図を参考に作成)

### 第3章 洋上風力発電システム

#### (2) 国内外の基準・規格・ガイドライン等

風力発電施設に対する基準・規格では、IEC が図 3.1.27 のような一連の国際規格を定めており、我が国の日本工業規格 JIS (Japanese Industrial Standards) にも整合した形で取り入れられている。これらのうち、IEC61400-3-1 は着床式を対象にした規格で、IEC61400-3-2 は浮体式を対象にした規格である。

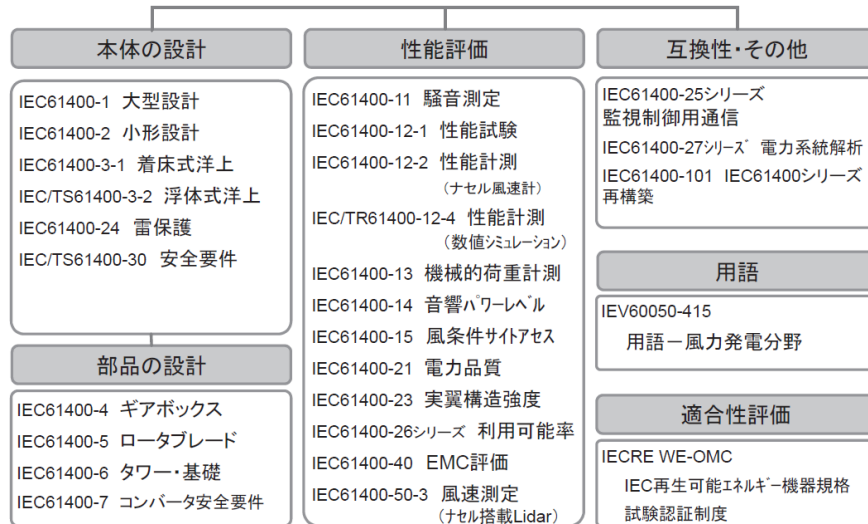


図 3.1.27 風力発電システムの国際規格体系 (IEC61400 シリーズ)  
(出典：松下崇俊、2017)

洋上風力発電施設は、船級協会（船舶・海洋構造物の技術上の基準を定め認証、検査等を行う非政府組織）も業務の対象としている場合がある。

我が国では、風車の支持構造物の構造安全性に対して陸上、洋上とも建築基準法が適用されていたが、現在では、着床式には電気事業法が、浮体式には船舶安全法が適用されている。着床式（陸上を含む）風力発電施設の支持構造については、土木学会による「風力発電設備支持物構造設計指針・同解説 [2010年版]」に詳しい。

浮体式の支持構造物については、国土交通省から「浮体式洋上風力発電施設技術基準」(2020) が発行されている。また、この基準の解説として「浮体式洋上風力発電施設技術基準安全ガイドライン」(2020) が発行されている。さらに、日本政府が認めた風車と支持構造物の唯一の認証機関である一般財団法人日本海事協会から、「浮体式洋上風力発電設備に関するガイドライン」(2012) が発行されている。なお、国土交通省の技術基準と日本海事協会のガイドラインは、ほぼ同等の内容である。

これらの規格・基準では、新しいコンセプトとして DLC (Design Load Case、設計荷重ケース) が導入されている。DLC とは、風、波、流れ等の外部環境条件と、運転、待機、故障等の風力発電施設の作動状況を組み合わせて、設計上で考慮すべき状況を網羅した条件群で、評価すべきケースは合計 30 以上になる。

### 第3章 洋上風力発電システム

#### (3) 風車およびウィンドファームの認証制度

認証 (certification) には、プロトタイプ (prototype) 認証、型式 (type) 認証、プロジェクト (project) 認証等がある。認証手続きを経ることで、設置された施設の安全性が確保される。

プロトタイプ認証は、商業化前の試験機が対象であり、個別に審査される。型式認証は製品としての認証であり、これが認められれば広く製造・販売することが可能になる。プロジェクト認証は、設置サイトの各種条件を考慮して事業として認証するものである。

認証制度の概要は以下のとおりである。まず、風車の設計・製造を行う者は、設計図面や想定される荷重と各部応力に関する計算結果、製造方法等を認証機関に提出する。認証機関は、これらの妥当性を確認し設計適合性の確認証を発給する。

認証機関に提出した図面や製造方法にしたがって製造された初号機は、試験サイトに据え付けられ、1年以上にわたり各種データの取得と機器の健全性確認がなされ、問題が無ければ型式認証書が発給される。

次のステップでは、現地風況に適した風車が選定されているかどうかといった観点に加え、作用するスラスト荷重や振動にタワーおよび基礎が十分耐えられるかどうか、また、大きな地震が発生した場合に風車の倒壊が無いかといった観点などから審査が行われる。据え付け完了後は試運転が行われ、安全性や設計の妥当性が確認されたウィンドファームにはプロジェクト認証書が交付される。図 3.1.28 を参照のこと。

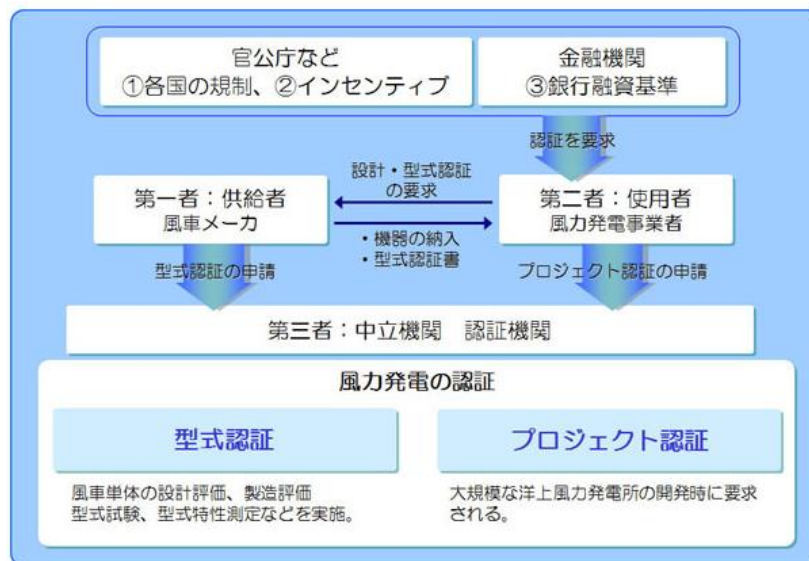


図 3.1.28 風力発電システムの認証制度の概要  
(出典：日本電機工業会ウェブサイト)

### 第3章 洋上風力発電システム

#### 3.2 着床式洋上風車

##### 3.2.1 支持構造形式

洋上風車の支持構造は、「基礎」「下部構造」「支持構造」などの多様な呼称があるが、ここでは「支持構造物 (support structure)」と呼ぶ。JIS「風車-第3部洋上風車の設計要件 (JIS C1400-3)」によると、支持構造物の定義は図 3.2.1 に示す通り、タワーおよび水中部、ならびに地中部の構造物を指している。

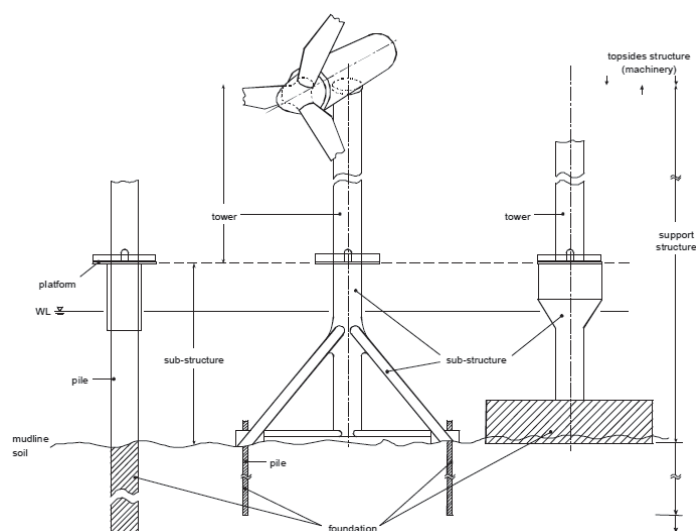


図 3.2.1 着床式洋上風力発電施設の概念図  
(出典：IEC、2009)

支持構造物の分類法は様々あるが、例として図 3.2.2 および表 3.2.1 を示す。

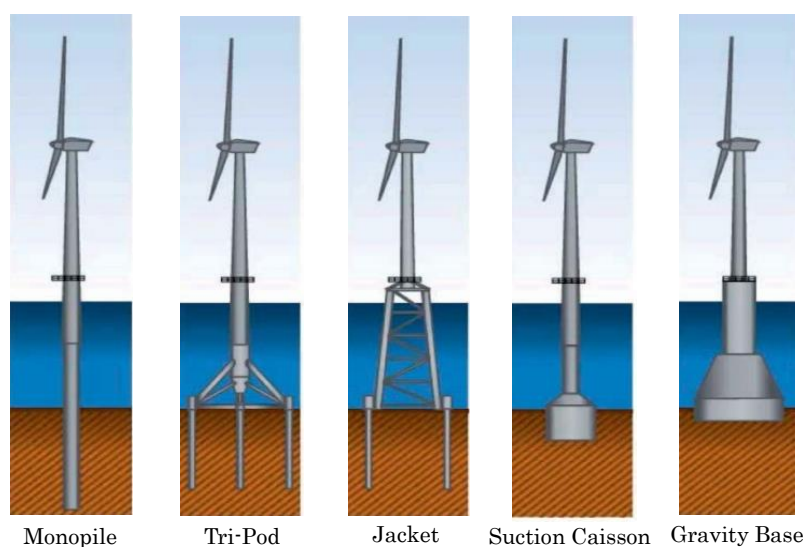


図 3.2.2 支持構造形式の代表例  
(出典：NEDO、2015 による図を一部改変)



### 第3章 洋上風力発電システム

表 3.2.1 着床式洋上風力発電施設支持構造物の分類

基本形	モノパイル	重力	ジャケット
発展形	トリパイル	PC 重力	小型ジャケット
	ドルフィン		Twisted Jacket
ハイブリッド形	トリポッド (モノパイルジャケット)		
	ハイブリッド重力 (重力ジャケット)		
	ハイブリッド重力 (重力モノパイル)		
	ハイブリッドサクション (重力モノパイルサクション)		

(出典：石原孟、2010 による表を参考に作成)

また、モノパイルおよび重力は水深 30m 以下、ジャケット、トリポッドおよびトリパイルは水深 30m～60m の海域への適用としている。

各方式の特徴は、以下のように整理できる。

#### (1) モノパイル

杭打ち機の進歩等により、洋上ウィンドファームでは大口径の杭を用いることによって単杭 (モノパイル) の構造が可能となった。現在では直径 12m 程度のものが建造可能となっている (図 3.2.3)。

年	2002	2008	2009	2012	2014	2015	2018~?
洋上ウィンドファーム	Horns Rev 1	Lynn, Inner Dowsing	Horns Rev 2	London Array	Baltic 2	Gode Wind II	
風車の定格出力(MW)	2.0	3.6	2.3	3.6	3.6	6.0	>8.0
水深(m)	<14	<18	<17	<25	<50	<60	<60+
モノパイル	長さ(m)	34	45	45	68	74	80
	直径(m)	4.0	4.7	3.9	5.7	6.5	8.5
	重量(tons)	160	350	210	650	930	1050

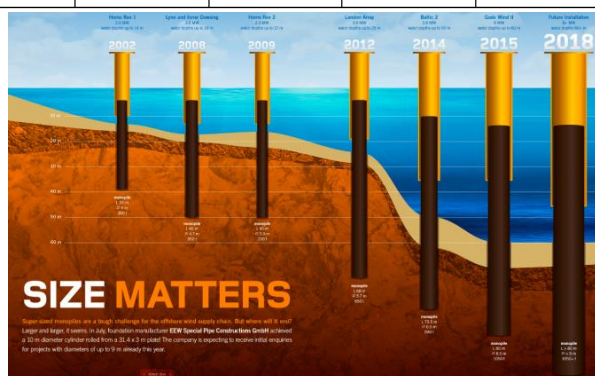


図 3.2.3 モノパイルの大きさの変遷

(出典：(上) NEDO、2015、(下) A2SEANEWS 社ウェブサイト)

### 第3章 洋上風力発電システム

#### (2) トリポッド (tripod)

3本の鋼管杭が中央のコラムと接合されている構造形式をトリポッドという。この構造形式は、海底石油・ガス採掘で、プラットフォームの周辺支持構造物として用いられており、コストパフォーマンスに優れていると考えられているが、洋上風車の場合には、水深25m以上、あるいは4MW以上の大型機にはコスト的に適さないとの考えもある。

#### (3) 3脚ジャケッ

鉛直からやや傾いた3本のコラムからなる構造で、従来、石油採掘プラットフォームに用いられてきた構造形式である。剛性が高いため、タワーとの連成振動をほとんど考慮する必要がないと言われている。

#### (4) 4脚ジャケッ

3脚ジャケッから更に剛性を高めた形式で、基本的特性は3脚ジャケッと類似している。図3.2.4にジャケッの構造を示す。最適化は安定性、重量、コストのみではなく、洋上風車全体の設計、建設、組み立て、設置および撤去の全てにわたって考える必要があり、表3.2.2～表3.2.3のように特性を整理している。

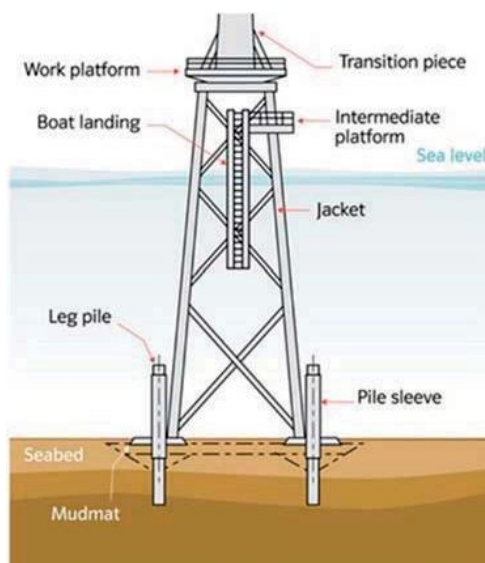


図 3.2.4 ジャケッ式の外観図  
(出典：4Coffshore ウェブサイト)

### 第3章 洋上風力発電システム

表 3.2.2 モノパイルと重力式基礎の特性

構造	設計		建設		設置		撤去	
	長所	短所	長所	短所	長所	短所	長所	短所
モノパイル	<ul style="list-style-type: none"> <li>・構造形状が単純</li> <li>・動的応答は構造の剛性により調整可能</li> <li>・水深3～20mに適している</li> <li>・基礎固定用の杭が不要</li> <li>・材料は鋼材のみ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・径が大きい場合、洗掘しやすい</li> <li>・地盤特性により性能が決まる</li> <li>・水深20～25mまたはそれ以上に適さない</li> <li>・軟弱地盤にはあまり適さない</li> <li>・岩盤の地盤には適さない</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・建設現場の費用は最小</li> <li>・鋼管が厚くない場合、選択できる圧延設備は多い</li> <li>・鋼管が厚くない場合の施工は容易、単純、経済的</li> <li>・現場への輸送が容易</li> <li>・海氷に対して特別な防護策は不要</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・深水域において細長比が大きすぎる</li> <li>・鋼管の厚さと径に大きく依存する</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・洗掘が無い場合、海底準備作業が不要</li> <li>・浮かせて輸送することが容易</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・杭打ち用機械が必要</li> <li>・巨礫・非常に固い粘土等のある場合では掘削用の杭を分割後に引き上げる必要がある</li> <li>・現地での組み継ぎと傾斜に対する調整が必要</li> <li>・長い杭の場合に現場溶接が必要</li> <li>・流れの速い場所では洗掘対策が必要</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・水中部分は撤去可能</li> <li>・分割後引き揚げ撤去</li> <li>・重い構造の撤去がない</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・地中の杭は撤去不可能</li> <li>・水中での分割作業</li> <li>・鋼管が厚い場合、切断が困難</li> </ul>
重力式基礎	<ul style="list-style-type: none"> <li>・海岸付近に建設ヤードが必要</li> <li>・構造特性が地盤特性の影響を受けにくい</li> <li>・基礎固定用の杭が不要</li> <li>・水深3～15mに適する</li> <li>・海氷には良い抵抗性を示す</li> <li>・構造がコンパクト</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・洗掘がある場合には適さない</li> <li>・動的には固い</li> <li>・形状はしばしば複雑になる</li> <li>・水深25m以上には適さない</li> <li>・波を受けた際に鉛直方向荷重が生じる</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・コンクリートを多量に使用する</li> <li>・ヤードで施工できる</li> <li>・ヤードから海へのアクセスが簡単</li> <li>・下部構造は主にコンクリート造</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・建設現場のための費用が高い</li> <li>・ウィンドファーム建設地点の近くに建設ヤードが必要</li> <li>・強力な吊上げ設備を備えた建設ヤードが必要</li> <li>・建設ヤードにかなりの広さが必要</li> <li>・洋上風車の大きさに依存する</li> <li>・大きさが水深に大きく依存する</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・基礎固定用の杭が不要</li> <li>・基礎全体を単一体として扱える</li> <li>・バージでの洋上建設地点までの輸送が可能</li> <li>・クレーンバージ船上での鉛直位置決めが可能</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・海底準備作業が必要</li> <li>・バラスト設置に費用がかかる</li> <li>・大きな吊上げ能力を備えたバージが必要</li> <li>・大型バージが必要</li> <li>・洗掘に対する大規模な対策が必要</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・供用期間終了時点で完全撤去が可能</li> <li>・撤去後に別の場所への移設が可能</li> <li>・クレーンを備えたバージ船を利用できる</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・バラスト撤去に費用がかかる</li> <li>・大きな吊上げ設備が必要</li> <li>・大きな重さに耐えるバージ船が必要</li> </ul>

(出典：Twidell, T. et al., 2011)

### 第3章 洋上風力発電システム

表 3.2.3 ジャケットとトリポッドの特性

構造	設計		建設		設置		撤去	
	長所	短所	長所	短所	長所	短所	長所	短所
3脚/4脚 ジャケット	<ul style="list-style-type: none"> <li>・洗掘の影響を受けにくい</li> <li>・動的応答は構造の剛性により調整可能</li> <li>・水深8～40mに適している</li> <li>・ジャケット頂部におけるたわみおよびたわみ角が小さい</li> <li>・様々な大きさの洋上風車に適している</li> <li>・波による鉛直荷重には影響を受けない</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・形状が複雑で海氷に弱い</li> <li>・各脚部に基礎杭が必要</li> <li>・8m以下の水深および40m以上の水深には適さない</li> <li>・腐食対策が必要</li> <li>・形状が複雑でコンパクトではない</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・海底石油・ガスの採掘で実績がある</li> <li>・全ての鋼管ラチスが溶接可能</li> <li>・海底に高低差がある場合でも適用可能</li> <li>・建設地点への輸送が容易</li> <li>・洋上風車の形式に制限がない</li> <li>・耐力の高い基礎として採用しやすい</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・特別な建設技術が必要</li> <li>・工場は洋上建設地点から離れている</li> <li>・ヤードでの組立に適していない</li> <li>・ヤードにかなりの広さが必要</li> <li>・基礎杭の長さが非常に長い</li> <li>・溶接が多い</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・洗掘の影響が小さく海底準備作業が不要</li> <li>・脚部と基礎杭には小口径の鋼管を用いる</li> <li>・クレーンバージあるいはSEP台船を利用可能</li> <li>・杭打ちのためのハンマが小さくて良い</li> <li>・設置のためにSEP台船が不要</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・杭打ち設備が必要</li> <li>・巨礫や非常に固い粘土のある地盤には掘削機が必要</li> <li>・浮かせて輸送することは困難</li> <li>・杭の現場溶接が必要</li> <li>・掘削なしでは岩盤地盤には適さない</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・水中部分の撤去のみ</li> <li>・分割後引き揚げ撤去</li> <li>・重い構造の撤去がない</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・地中の杭は撤去不可能</li> <li>・水中での分割作業</li> <li>・鋼管が厚い場合には切断が困難</li> </ul>
トリポッド	<ul style="list-style-type: none"> <li>・洗掘の影響を受けにくい</li> <li>・動的応答は構造の剛性により調整可能</li> <li>・水深8～40mに適している</li> <li>・トリポッド頂部におけるたわみおよびたわみ角が小さい</li> <li>・様々な大きさの洋上風車に適している</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・形状が複雑で海氷に弱い</li> <li>・各脚部に基礎杭が必要</li> <li>・8m以下の水深および40m以上の水深には適さない</li> <li>・腐食対策が必要</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・海底石油・ガスの採掘で実績がある</li> <li>・全ての鋼管ラチスが溶接可能</li> <li>・海底に高低差がある場合でも適用可能</li> <li>・建設地点への輸送が容易</li> <li>・基礎杭の長さが短い</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・特別な建設技術が必要</li> <li>・工場は洋上建設地点から離れている</li> <li>・ヤードでの組立に適していない</li> <li>・ヤードにかなりの広さが必要</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・洗掘の影響が小さく海底準備作業が不要</li> <li>・脚部と基礎杭には小口径の鋼管を用いる</li> <li>・クレーンバージあるいはSEP台船を利用可能</li> <li>・杭打ちのためのハンマが小さくて良い</li> <li>・設置のためにSEP台船が不要</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・杭打ち設備が必要</li> <li>・巨礫や非常に固い粘土のある地盤には掘削機が必要</li> <li>・浮かせて輸送することは困難</li> <li>・杭の現場溶接が必要</li> <li>・掘削なしでは岩盤地盤には適さない</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・水中部分の撤去のみ</li> <li>・分割後引き揚げ撤去</li> <li>・重い構造の撤去がない</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・地中の杭は撤去不可能</li> <li>・水中での分割作業</li> <li>・鋼管が厚い場合には切断が困難</li> </ul>

(出典：Twidell, T. et al., 2011)

## 第3章 洋上風力発電システム

### 3.2.2 安全性

#### (1) 安全に関する基本的考え方

安全性照査の基本は、供用期間中の全ての状態に対して所要の健全性を担保することである。対象となる状態は、規格で規定されるが、運転、故障、待機等の想定される全ての状態が含まれる。これは、石油・天然ガス産業における海洋構造物に比べて、各状態によって荷重の状況が大きく変化することに起因している。

洋上風車は、陸上風車に比べて第三者への危害の可能性は低いと考えられるが、アクセスが制限されることから信頼性が重要となる。したがって、保守制約条件が念頭に置かれることにより、故障条件が重要な位置を占めている。一方で、有人の船舶とは異なり人命および海洋汚染のリスクが小さいことに鑑み、最終的な生存能力あるいは破滅的な崩壊に至らないための冗長性に係る事故限界条件は重視されない。

なお、洋上風車は居住施設ではないものの作業員に対する人命の安全、および周辺に航海および航空に関する人命の安全は考慮される。装備品および運用面での規定によって、これらに関する所要の安全性を担保するように配慮される。

#### (2) 洋上風力の特異的技術事項

##### ① サイト評価

石油・天然ガス産業における海洋構造物と同様に、設置されるサイトでの気象・海象および地盤条件によって設計される。気象・海象条件は、あらかじめ観測によって蓄積されたデータが無いか、もしくは限定的であるため、推算に依るところが大きい。確立され合意された推算手法の規格化は、いまだ途上にある。

##### ② 荷重解析シミュレーション

非線形および動的な荷重の評価のための時刻歴シミュレーションは、重要技術である。風車と支持構造のそれぞれの荷重と応答を連成させて統一的に解く解析が必要とされる。例えば、米国の国立再生可能エネルギー研究所（NREL : National Renewable Energy Laboratory）が作成しているプログラムは、図 3.2.5 のような構成になっている。

また、波については、非線形波形の影響を考慮する手法が議論され、従来の決定論的な方法からの転換が図られようとしている。具体的には、線形波の重ね合わせで発生させた不規則波に、最大波高を想定した非線形波を埋め込んで波形時系列を生成する手法が検討されている。

風車の制御は、それ自体の性能が発電性能に直結すると共に、荷重評価においても重要な影響を持っている。連成解析（coupled analysis）の中で、発電に対する制御ソフトウェアおよびハードウェアの妥当性を検証すると共に、支持構造の荷重に対する影響も評価される。

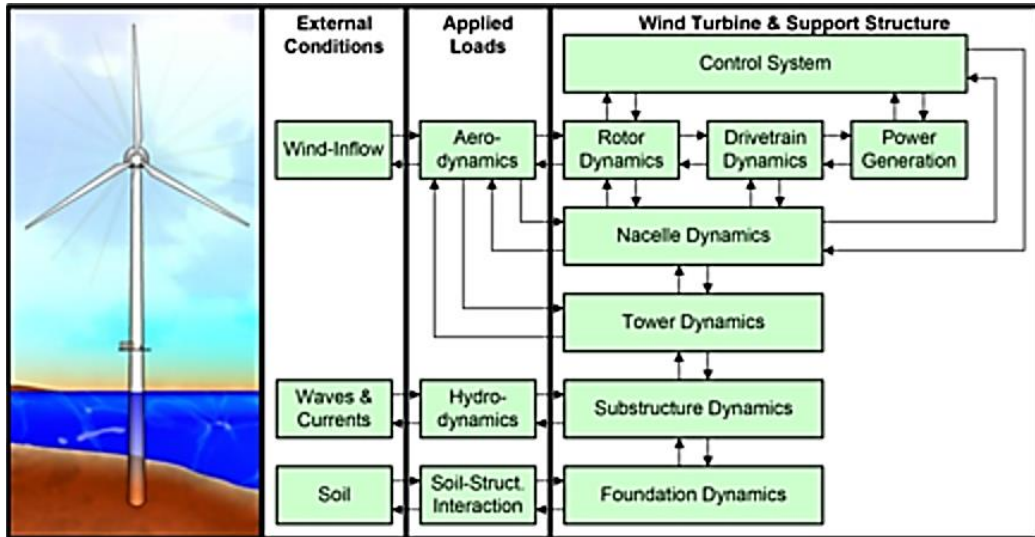


図 3.2.5 風力発電施設の連成解析プログラムの構成  
 (出典：National Renewable Energy Laboratory ウェブサイト)

③ 地盤と杭の関係

支持構造において、最終的には荷重は地盤で吸収される。設計的には、水平荷重、垂直荷重、転倒モーメントで整理され、ジャケット等、構造様式によっては、転倒モーメントは更に垂直荷重の偶力に分解される。図 3.2.6 にモデル化を示す。

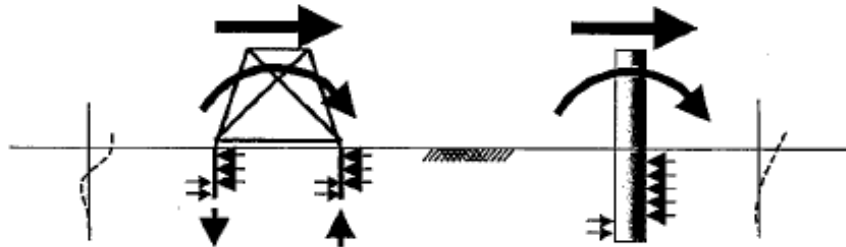


図 3.2.6 杭構造における水平力とモーメントの伝達  
 (出典：Twidell, T. et al., 2011)

地盤反力をモデル化するためには地盤バネが使用されるが、非線形的な特性が記述される必要がある。石油・天然ガス産業で規格化された手法が使用できるが、杭径の範囲が従来経験を逸脱する場合があることや、繰り返し荷重に対する従来経験が十分ではない点など、今後、注意深く対応すべき部分も残されている。

地盤バネは、一般的には図 3.2.7 のようにモデル化される。

### 第3章 洋上風力発電システム

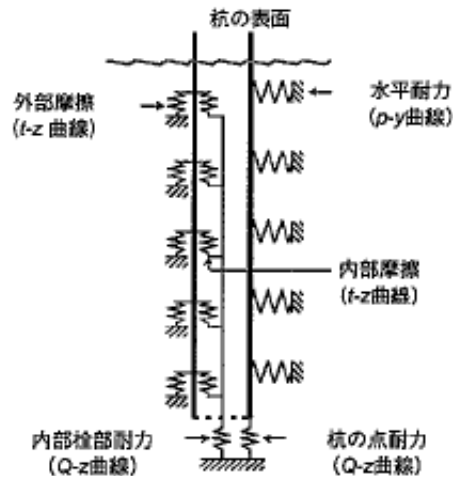


図 3.2.7 杭と地盤の相互作用に関するバネモデル  
(出典：Twidell, T. et al., 2011)

洗掘 (scouring) も重要な現象である。洗掘とは波浪・海流・潮流等によって生じる海洋構造物周辺の海底地形の変化 (底質の流失) である。鉛直杭が海底に設置される場合、図 3.2.8 に示すように、杭の基部の前面に馬蹄形渦が形成され、杭の下流側に渦が放出されることで、杭側面の外側で流速が増す。局所的な流速変化により海底を構成する堆積物と水流の間の摩擦力である底面せん断応力が増加、閾値を超えると堆積物の移動が生じる。

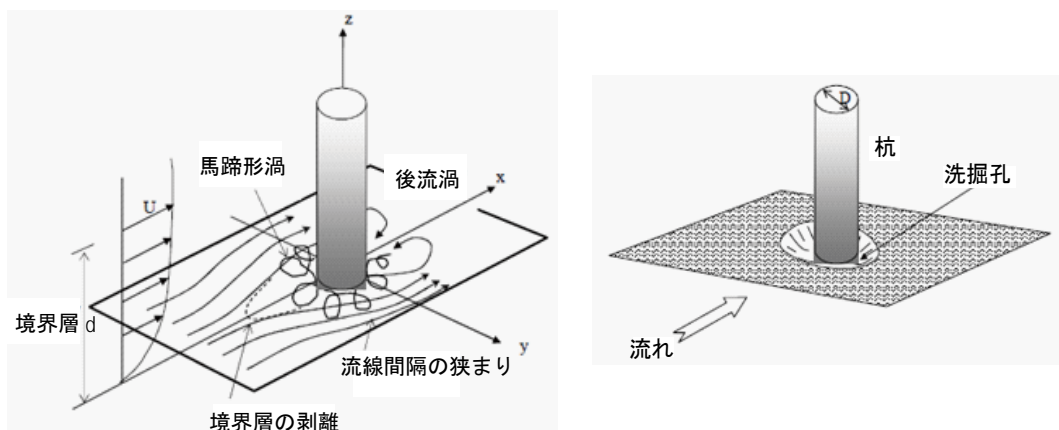


図 3.2.8 鉛直杭の基部まわりの流れ  
(出典：土木学会、2010)

洗掘が生じる前に海底で想定されていた地盤の耐力は、一旦洗掘が生じ始めると、海底表層付近の地耐力が失われる。予想される洗掘深に対して、海底表層付近の地耐力の変化を考慮し、杭にとって安全側となる評価を行う必要がある。また、洗掘により杭基礎の海底根入れ部分の土砂が流失し、杭長が長くなることは構造物の固有周期の変化を意味する。固有周期が変化すると、設計要求固有周期からの逸脱により風車機能に影響を及ぼす可能性が発生する。風車サイトにおける洗掘範囲や洗掘防止にあたっては、以下の方法に基づき評価するものとする。

### 第3章 洋上風力発電システム

- ・海底面の特性が類似したサイトや近隣のサイトにおける以前の記録に基づいて求める。
- ・水理実験から求める。
- ・模型実験によって校正した計算から求める。

洗掘は数値計算手法が未だ確立されておらず、モデル実験および現地経験によるところが大きい。一方で、従来の経験はより小径の杭に関するものであり、洋上風力で多用される範囲の杭径に対しては、今後、知見の蓄積を図っていく必要が残っている。

#### ④ コンセプトのバリエーション

様々なサイト特性に対して最適化した支持構造のコンセプトが積極的に開発されている。石油・天然ガス産業での経験に基づき、鋼鉄製またはコンクリート製で考えられている。荷重の伝達に関する概念や、個別の部材の耐力評価の考え方等は、石油・天然ガス産業での考え方が準用可能であるが、上記の各項目の考慮を取り入れる必要がある。

#### (3) 設計上の留意点

風車の空力的な加振力に対する応答が重要である。加振源となるロータは流れ場の不均一性の影響を受けて周期的な荷重を発生する。ここでの流れ場の不均一性には、地上からの高さ方向の風速のプロファイルの影響やタワーの後流の影響が含まれる。周期的荷重の周波数は、ロータの回転数とブレード翼数に依存し、下記の2種類が主要成分である。これを加振周波数という。

$$f_r = 1/N \quad (\text{回転周波数}) \quad (3.2.1)$$

$$f_n = 1/N \cdot n \quad (\text{ブレード周波数}) \quad (3.2.2)$$

ここで、

$N$  : ロータの回転数

$n$  : ブレード翼数

加振力に対する構造の過大な応答を抑える手段として、加振力を相殺する力や減衰力を付加することもあるが、まず考えられることは、構造の固有振動数の適切化である。加振周波数と構造の固有振動数が近い場合には共振が発生し構造応答が最大化する。したがって、構造の固有振動数を加振周波数から十分離しておけば共振を避けることができ、ひいては構造の過大な応答を避けることができる。ここで、加振周波数と構造の固有振動数の関係は、下記の三つのケースを考えることができる。なお、構造の固有振動数は多数存在し、周波数の低い方から「 $n$ 次の固有振動数」と呼び、最低次すなわち1次の固有振動数が特に重要である。

#### ① 剛構造

1次の固有振動数をブレード周波数より高く設定する。自ずから、高次の固有振動数も全て加振周波数を回避することになる。構造の剛性を高くすることによって達成する。



### 第3章 洋上風力発電システム

#### ② 柔構造

1 次の固有振動数を回転周波数より低く設定する。高次の固有振動数の共振に注意が必要である。構造の剛性を低くすることによって達成する。

#### ③ 中間構造

1 次の固有振動数を回転周波数とブレード周波数の間に設定する。高次の固有振動数の共振に注意が必要である。構造の剛性を低くすることによって達成する。

可変速風車の場合には、ロータ回転速度の変化域も考慮が必要であり、これらを図示すると、図 3.2.9 のようになる。

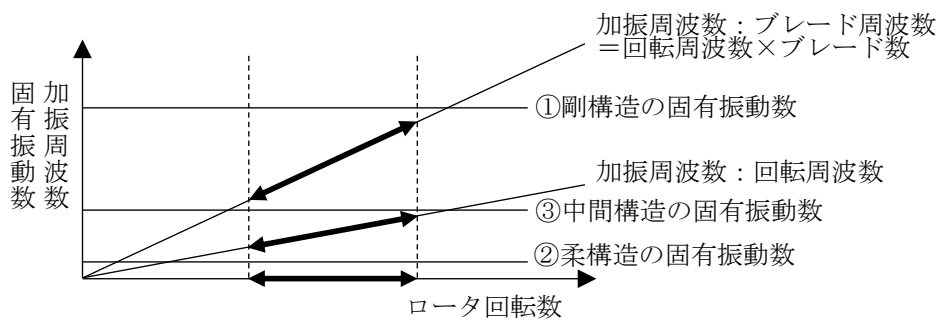


図 3.2.9 ロータ回転速度の変化域の考慮

風車は大型化の傾向にあり、ロータ直径、ならびにタワー頂部の質量は大きくなっている。周速比（風速に対する翼端の周速度）が一定の場合、ロータ直径が大きくなるに従い、回転周波数は低下する。一方、ロータ直径の増加はタワー高さの増加につながり、タワーの固有振動数も低下する。ここで、回転周波数の低下と比較して、固有振動数の低下の方が顕著であり、風車の大型化に伴って、剛構造から柔構造への変化を指向するのが一般的である。この場合には、前述の高次の固有振動数にも注意が必要である。

柔構造の場合には、波浪荷重による励振にも注意が必要である。一般的な加振周波数の分布を図 3.2.10 に示す。ここで  $f$  はロータの回転周波数、 $f_3$  は 3 翼風車のブレード周波数である。概念的な図であるが、このような主な加振周波数について、構造の周波数が同調しないよう考慮する必要がある。

### 第3章 洋上風力発電システム

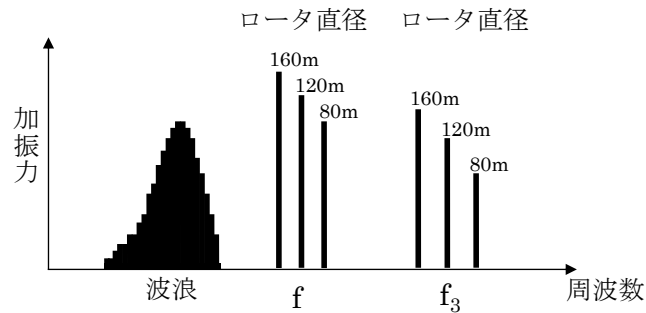


図 3.2.10 加振力の大きさの概念

風車の大型化に伴い、回転周波数と波浪の周波数を共に回避するためには精度の良い構造設計が必要であることが分かる。一方、共振による過大な応答に対して、救済的な要因を考慮できる場合がある。主なものの一つは、ロータの空力減衰である。発電時において制御方法に十分に注意すれば、ロータの空力特性はタワーの振動に対して減衰力として作用することが知られている。その場合には、共振が発生したとしても、構造応答は大幅に低減できる場合もある。もう一つは、回転速度制御の活用である。例えば、制御によって、回転振動数が共振点に留まらないようにして、共振を回避することができ、既に実績もあるが個々の風車の固有振動数は地盤条件や据え付け時の特性などの不確定要素の影響を強く受けるので、精度の良いチューニングが必要である。

#### (4) 地震荷重評価

##### ① 基本的考え方

欧州で先行して発達した洋上風車であるが、我が国に適用する場合には、我が国特有の地震に対する評価が重要である。ここでは、海洋プレート型の地震および活断層による地震を考慮する。震源は建設地点近傍のみではなく、津波の影響のある遠地の大規模地震も考慮する。

洋上では陸上と異なり海水の影響を考慮する。例えば、着床式では浮力による自重の低減に伴い基礎底面の設置圧が低下し、また構造物の没水面に加わる水の付加質量の影響により地震時の水平力が大きくなるため、滑動しやすくなる。杭基礎では、杭と地盤が接する面において繰り返しの影響により陸上に比べ地盤剛性が低下しやすい特徴がある。

地盤条件の評価では、着床式構造物を支持する地盤の物理的性質、力学的特性を設定する必要があり、直接基礎、杭基礎など支持形式に応じて地中部の地盤物性の評価が重要となる。また、地盤の液状化の可能性、基礎構造および周辺地盤の長期的な沈下や地盤安定特性の検討に必要な地盤物性を評価する必要がある。設計に用いる地盤物性は、詳細な現地地盤調査を実施して、地盤調査結果に基づき設定する。

地盤調査は、地質学的調査、物理探査、地盤土壌調査に分けられる。地質学的調査は建設地点周辺の地質に関する既存資料に基づき、地盤調査方法や構造物基礎の選定の基

### 第3章 洋上風力発電システム

本情報を得るために行う。物理探査は、音波探査や弾性波探査と地盤調査結果を組み合わせ、ウィンドファームが存在する範囲の海底地形や地層の情報を作成する。地盤土壌調査は、原位置でのボーリングやサンプリング資料による室内試験を行い、詳細基礎設計のための情報を取得する。

#### ② 地震荷重の評価に用いる解析手法

地震荷重の評価手法としては、一般的に時刻歴応答解析(動的解析、dynamic analysis)と応答スペクトル法があるが、いずれも構造物の振動特性を再現できる解析方法を採用する必要がある。

時刻歴応答解析では、設計用地震動を用いて運動方程式を時々刻々解くことにより、風車の応答(変位、速度、加速度等)を算出し、最大地震荷重を求める。一方、応答スペクトルでは、応答スペクトルおよび風車の固有周期、減衰比、モード形、質量分布等を考慮し、最大地震荷重を求める。風車タワーの構造特性から、地震荷重を算定する際には必ずしも1次モードが支配的とならないため、留意が必要である。

解析においては、風車の自重他に、積載荷重および積雪荷重を考慮する。

地震によって生じる地盤の液状化は、地盤の剛性を低下させ、支持力を失うなど基礎に甚大な影響を及ぼすので、地盤の液状化が生じないように対策を施すか、または地盤の液状化による影響を十分に考慮して評価する必要がある。

地盤が軟弱な場合には杭基礎が用いられるが、地中にある杭は地震動による地盤の変位に起因した外力が作用する。したがって、杭に作用する応力を求める場合には、風車タワー、定着部、フーチング(footing)の慣性力の他、地盤変位によって生じる力を考慮しなければならない。

洋上構造物、特にケーソン基礎などでは海水の付加質量による動水圧の影響が無視できない。そのため動水圧のモデル化を行い地震応答解析モデルに考慮する必要がある。造波減衰については、影響が小さいため考慮する必要はない。

着床式構造物では浮力と付加質量の影響により、陸上構造物に比べ滑動しやすくなるため、レベル2(極稀)地震時には滑動を許容した設計となることがある。そのため、基礎底面と地盤バネ(swayバネ)の間に滑動を考慮した復元力モデルを付与することにより、滑動量を評価する必要がある。ただし、滑動を考慮したモデルでの地震応答解析では、構造物に入力する地震力が制限されることにより、構造物にとって必ずしも安全側とならない。そのため、構造物の照査には滑動しない条件での応答解析結果を用いるなどの配慮を要する。

風車・基礎および地盤の相互作用を考慮できるモデルの例を図3.2.11に示す。計算時間と精度の兼ね合いからSRモデルが多用される。SRモデルとは、基礎の自由度を水平運動(sway)と回転揺れ(rocking)の2自由度に集約したモデルである。

SRモデルでは、基礎底面に水平地盤バネ、回転地盤バネおよびそれらに対応する減衰係数を設けて地震応答解析を行う。地盤バネと回転地盤バネおよび減衰係数は、地表面直接基礎、埋込み基礎、杭基礎等の基礎形式を考慮して算定する。

### 第3章 洋上風力発電システム

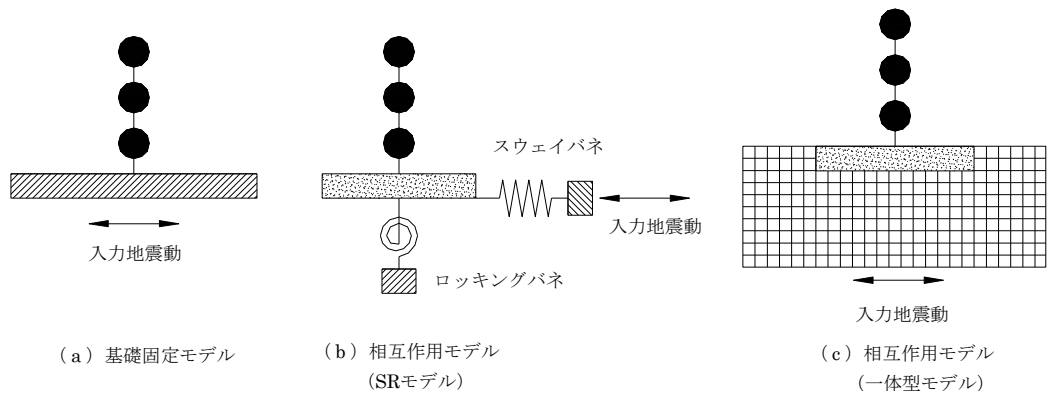


図 3.2.11 基礎固定モデルと相互作用モデル  
(出典：土木学会、2010 による図を参考に作成)

杭応答を評価する解析モデルには、風車・基礎と杭の応答解析を別々に行う分離型モデルと、風車・基礎と杭を一体モデルとして連成解析を行う一体型モデルがある。図 3.2.12 に地震時の杭応答の解析モデル例を示す。

	分離型モデル		一体型モデル	
	SRモデル+応答変位法	杭集約モデル	杭全体モデル	
モデル	<p>&lt;応答変位法&gt; 建物からの慣性力 地盤変位 <math>u_g</math> 水平地盤バネ <math>K_h</math> 回転地盤バネ <math>K_r</math> 杭周地盤バネ</p> <p>&lt;SRモデル&gt;</p>	<p>建物 基礎 杭 地盤の応答波形 <math>K_r</math> <math>K_p</math> <math>K_s</math></p>	<p>建物 基礎 杭先端の地盤バネ <math>K_r</math> <math>K_p</math> <math>K_s</math></p>	
特徴	<ul style="list-style-type: none"> <li>建物と杭の応答を別々に計算する分離型モデル。</li> <li>杭応力は応答変位法を用いて求めることができる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>杭基礎-建物一体型による動的解析モデル。</li> <li>杭は一本杭としてモデル化するが、杭周地盤バネに群杭効果を考慮できる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>杭基礎を多本杭にモデル化した一体型モデル。</li> <li>群杭-地盤系を2次元FEMを用いてもモデル化できる。</li> </ul>	

図 3.2.12 地震時の杭応答の評価モデル  
(出典：土木学会、2010 による図を参考に作成)

分離型モデルは、SR モデルと応答変位法により風車・基礎と杭の応答を別々に計算するモデルであり、杭頭慣性力は SR モデルの応答解析結果より得られる水平地盤バネ反力の最大値を用いる。地盤変位により生じる杭の応答は、応答変位法により静的に求める。杭の応答を動的に求める場合には、杭頭慣性力と地盤変位の時刻歴を杭に同時に作用させる必要があり、解析時間は長くなるが、杭材の非線形を考慮することができる。

一体型モデルには、杭集約モデルと杭全体モデルがある。杭集約モデルでは、杭を一本杭としてモデル化するが、杭周地盤バネには群杭効果を考慮でき、地盤-杭-構造物

### 第3章 洋上風力発電システム

の非線形挙動も時刻歴応答解析で評価することができる。一方、杭全体モデルでは、杭を多本杭としてモデル化し、杭軸力と曲げモーメントの時刻歴を評価することができる。また、2次元 FEM (Finite Element Method、有限要素法) を用いたモデル化も可能である。一体型モデルは杭頭慣性力と地盤震動により生じる杭応力を精度良く評価することが可能である。特に杭全体モデルでは各杭に作用する外力を正確に評価することができ、また各杭に作用する変動軸力を取り入れることにより、杭体の非線形性を考慮した解析が可能である。

#### ③ 付加的な荷重効果

付加的な荷重効果として、必要に応じて P-Δ 効果、ねじれの影響、および上下動の影響を考慮する。

##### a) P-Δ 効果

レベル 2 地震に対しては、自重と水平変形により生じる付加曲げモーメント、いわゆる P-Δ 効果 (図 3.2.13) を幾何学非線形に考慮して評価するか、または次式により求める。

$$M_{PDi} = \sum_{j=i+1}^N W_j (x_j - x_i) \quad (3.2.3)$$

ここで、

$M_{PDi}$  : 第  $i$  層に作用する付加曲げモーメント

$W_i$  : 第  $i$  層質点重量

$x_i$  : 時刻歴応答解析により計算された第  $i$  層の最大水平変形

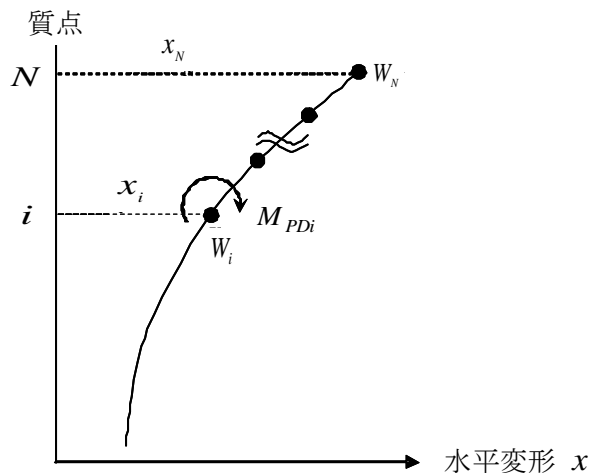


図 3.2.13 P-Δ 効果

(出典：土木学会、2010 による図を参考に作成)

### 第3章 洋上風力発電システム

#### b) ねじれに対する影響

風車タワーおよび基礎の構造計算に用いる地震時のねじれモーメントは、偏心を考慮したモデルにより求めるか、ナセル位置での応答加速度の最大値に偏心重量およびタワー中心からの偏心距離を乗じて評価する。図 3.2.14 にねじれモーメント発生 の概念図を示す。

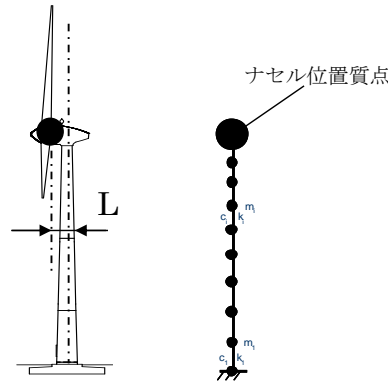


図 3.2.14 ねじれモーメント発生 の概念図  
(出典：土木学会、2010 による図を参考に作成)

#### c) 上下動の影響

地震時の上下動によりタワーに生じる上下方向の軸力変動およびロータとナセルの偏心重量による付加曲げモーメントは小さいが、水平動による転倒モーメントに対してタワー断面の余裕度が少ない場合には、上下動の影響を考慮する必要がある。

#### (5) リスク評価

包括的な安全性の評価のためにリスク解析が求められる場合が多い。リスク解析は、保険業者やウィンドファームの運転管理者にとっても必要な情報を与える場合がある。

リスク評価は、基本的には、非安全な事項を同定する作業とそれらの事象が起こる確率とその結果の甚大性を推定する作業で構成される。ここでリスクとは、発生頻度と結果の甚大性の積、すなわち被害の期待値を意味し、類似の条件下で作動する類似のシステムとの比較で評価される。

望ましくない事象の整理方法はいくつかあるが、例えば下記に分類できる。

- ・人体の健康・生命への影響
- ・環境的影響
- ・経済的影響
- ・社会的影響
- ・倫理的、政治的、法的な影響

これらの評価に当たって、実務的には、あらかじめ主要な要素を限定しておく方が便利

### 第3章 洋上風力発電システム

である。このような観点で、手法に関する研究が実施され、総合的安全評価（FSA : Formal Safety Assessment）等の呼び名で結果が整理されている分野もあるが、洋上風車の分野では未だ研究途上である。

#### 3.2.3 設置工事

##### (1) 概要

洋上風車の各コンポーネントは基本的には工場で作製されるが、ここでは現地施工について説明する。洋上風力発電の施工は、基礎工事、風車設置工事および電気工事に大別される。これらの施工に際して、安全・品質・工程および経済性を十分に検討し、施工計画を立てることが重要であり、施工計画の主な要点は以下の通りである。

- ・施工条件：水深・地形、気象・海象条件等の自然条件および航行船舶、避難港、支障物等の社会条件を踏まえ、現地調査に基づいて計画を立てる。
- ・施工方法の選定：施工条件のもとで、作業船、仮設計画、工程計画等について、通常は複数ケースの比較検討を行なって、適切な工法を選定する。
- ・総合評価：選定された工法について工事費を見積もるとともに、安全性・品質管理等の実行上の課題を検討し、施工計画の妥当性を総合評価する。

上記検討においては、海底地盤整備、支持構造物の設置、風車の据え付け、海底の送電ケーブル（export cable）、アレイケーブル（array cable）、洋上変電所等の諸工事が工期内に支障なく、安全に行われるようにする必要がある。

##### (2) 支持構造物の各構造形式の施工

###### ① モノパイル式基礎

基本的な施工の流れは、図 3.2.15 のとおりである。欧州におけるモノパイルの実勢設置所要日数として、3.6MW 機で 2.5 日～3 日、5MW 機で 3 日～3.5 日という調査がある。

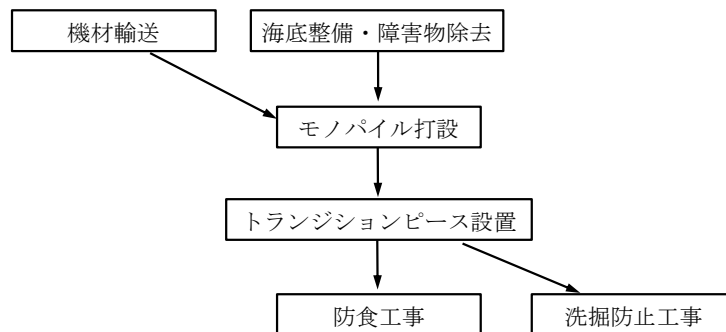


図 3.2.15 モノパイル式の施工の流れ

### 第3章 洋上風力発電システム

モノパイル打設の工法の主なものとして、油圧ハンマ打撃工法と振動式杭打ち工法がある(図 3.2.16)。油圧ハンマ打撃工法は、油圧でラム(錘)を持ち上げた後で落下させて鋼管杭を直接打撃する工法、振動式杭打ち工法(バイブロハンマ)は、ハンマ内で偏心重錘が回転することで鋼管杭に振動与えて打設する工法である。油圧ハンマの方が、小型の機器で大きな打撃力を発生できるが、バイブロハンマの方が、騒音や振動が少ないとされている。



図 3.2.16 モノパイル打設の工法

(出典：(左) Ballast Nedam 社、(右) POWER & ENERGY SOLUTIONS 社 ウェブサイト)

トランジションピース (transition piece) は、モノパイルと風車の接続装置であり、風車の垂直性を確保するために設置される(図 3.2.17)。トランジションピースとモノパイルの間は、グラウチング(セメントミルク、モルタル)を充填して接合される。なお、後述の各工法においても類似のトランジションピースが設置される。



図 3.2.17 トランジションピースの運搬と設置

(出典：(左) BOW Terminal 社ウェブサイト、(中) Offshorewind 社ウェブサイト、(右) Ballast Nedam 社ウェブサイト)

洗掘防止工としては、次のようなものがある。

#### 1) 海底面被覆工

あらかじめ予想される洗掘域を透水性または不透水性の材料で覆う対策法

#### 2) 導流・減勢工

構造物本体に付設するか、本体から離れた地点に設置した付帯設備によって、



### 第3章 洋上風力発電システム

波や流れのエネルギーを分散または減少して洗掘力を弱めるか、本体に影響のない遠方へ誘導する対策法

#### 3) 基礎根固工

波や流れの影響の小さい所で用いられる小規模な対策法

#### ② 重力式基礎

基本的な施工の流れを図 3.2.18 に示す。一般財団法人日本船舶技術研究協会（2013）では、欧州における重力式の実勢設置所要日数として、3.6MW 機で 3 日～5.5 日、5MW 機で 3.5 日～6 日としている。

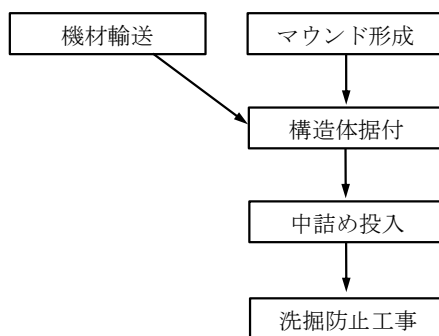


図 3.2.18 重力式の施工の流れ

マウンドの形成は、海底面の水平度と支持強度を確保するために行われ、海底掘削、割石投入、敷き均し等を通して地盤を改良する作業で、主に以下の 2 工程からなる。

- ・掘削：グラブ浚渫船等を使用して行われる。浚渫深度は、0.5m～10m 程度とされており、浚渫土砂は中詰め用に用いられる場合もある。
- ・マウンドの形成：浚渫後に砂利、碎石等を投入して行われる。

施工断面図の例を図 3.2.19 に示す。

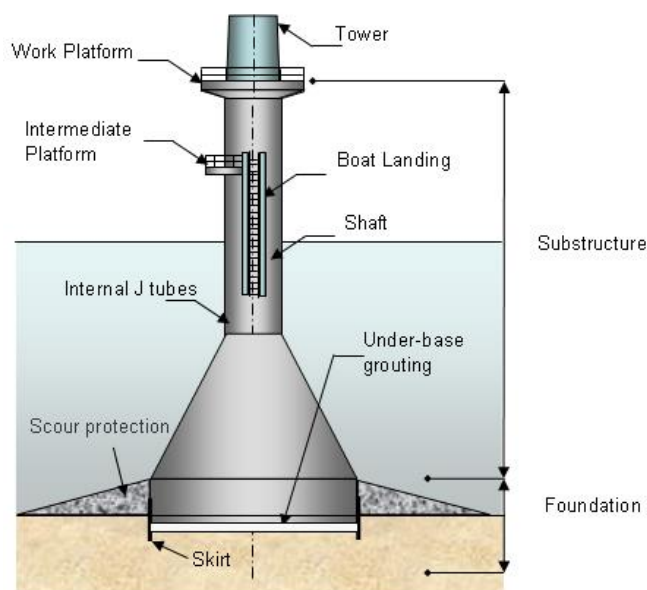


図 3.2.19 重力式の施工断面図例  
(出典：Wind Energy the Fact ウェブサイト)

③ ジャケット式基礎

基本的な施工方法として、ジャケット先行方式（仮受杭方式）と杭先行方式（先行杭方式）の2方式がある（図 3.2.20）。前者は、仮受け杭を先に打ってそれにジャケットを仮置きし、ジャケットの下部にあるスリーブパイプ（sleeve pipe）を串刺しして本杭を打つ方式である。後者は、杭を先に打って、その後にジャケットの下部にあるスリーブパイプを杭に通して敷設する方式である。

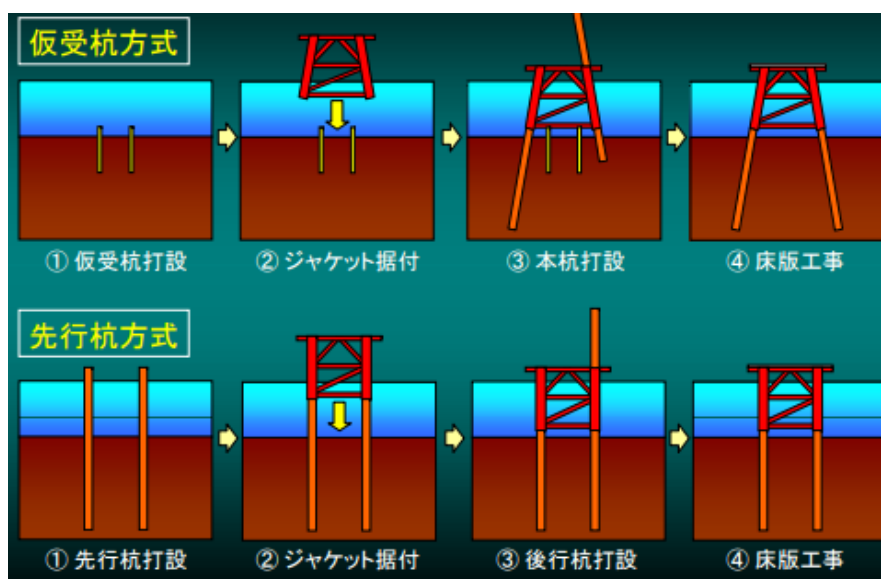


図 3.2.20 ジャケット式基礎の施工方法  
(出典：JFE エンジニアリング社、2009)

### 第3章 洋上風力発電システム

ジャケットは、クレーン船の性能やジャケットの大きさ、重量等に応じて、垂直または水平の状態、製作ヤードから設置場所まで輸送される。ジャケットとトランジションピースの製作状況を図 3.2.21 に示す。

一般的に、ジャケットの高さが 40~45m 以下の場合、垂直輸送が有利とされている。



図 3.2.21 ジャケット (左) とトランジションピース (右) の製作状況  
(出典 : Robertson J、2008)

ジャケットを垂直の状態に輸送した場合には、据え付けは比較的簡単な形 (図 3.2.22) となるが、ジャケットを水平の状態に輸送する場合には、少し複雑な据え付け手順となる。



図 3.2.22 ジャケットの吊り上げ (左) と据え付け (右) 状況  
(出典 : (左) Ballast Nedum 社ウェブサイト、(右) Robertson J、2008)

ジャケットを水平の状態に輸送した場合の据え付けの概念を図 3.2.23 に示す。まず、ジャケットを水上に降ろすが、この場合、クレーンで吊り下げて降ろす方法の他、同図 (a) に示すように輸送バージを傾けて、スライド式に進水させる方法もある。進水時には、ジャケットを構成する鋼管の端部をゴム製の膜で密封する等により、必要な浮力を確保することが必要である。

### 第3章 洋上風力発電システム

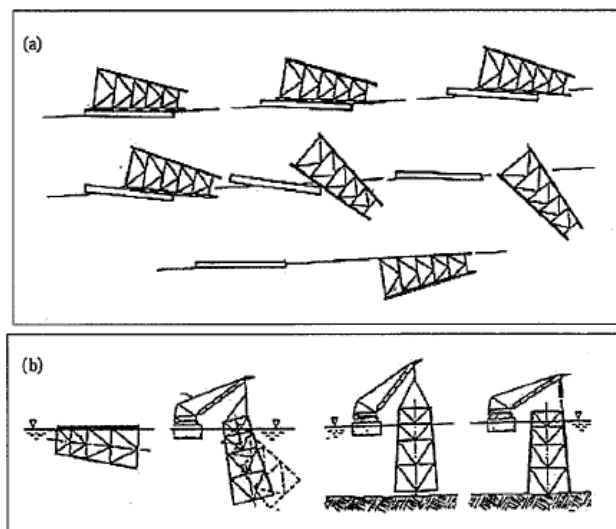


図 3.2.23 ジャケットの据え付け工程概念図の例  
(出典：Twidell, T. et al., 2011)

進水後（同図(b)）では、ジャケットの頂部をクレーンにつなぎ、ジャケットを垂直状態に引き起こす。その際は、ジャケットの頂部をクレーンで吊り上げると共に、ジャケットの脚部に注水することによりジャケットを回転させる。最後に、ジャケットを規定位置に着座させて、ジャケット内部に完全に注水して安定させる。

#### (3) 風車の設置工事

通常、風車本体の支持構造物への取付けは、図 3.2.24 に示すようにタワー、ナセル、ロータの順で組み立てられる。なお、ナセルとロータの一部を同時に搭載し、最後にブレードを取り付ける工法も一般的である。

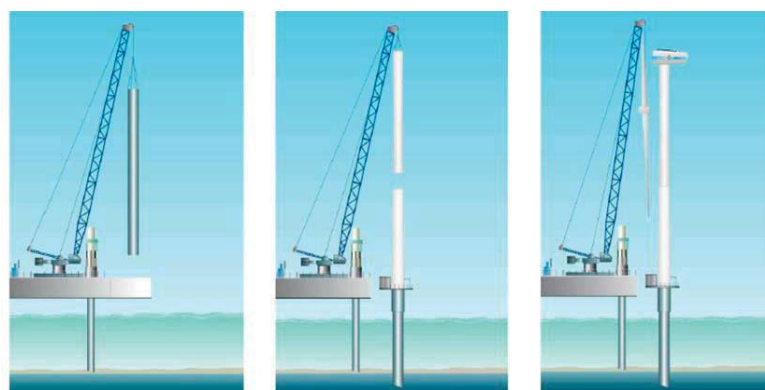


図 3.2.24 風車の設置工事の模式図  
(出典：Gerrad Hassan, 2009)

### 第3章 洋上風力発電システム

一方、海上での作業時間を短縮し、安全に設置するための研究開発が行われており、例えば、ロータとハブまたはロータ・ナセルの一体型を吊り上げ、究極的には陸上で風車を全て組み立て一体化して、運搬・設置する方法などが検討されている。

#### (4) 海底ケーブルの敷設

まず、候補ルートを選定に当たっては、海底地形、底質等の自然条件、船舶の航行、漁業活動等の社会条件等を調査検討しなければならない。

海底ケーブル構造の一例を図 3.2.25 に示す。海底ケーブルは漁具や投錨による損傷を防止するため、ケーブルの最外部には鉄線を密に配置する。さらに、通常は海底部に埋設する工法が広く採用されている。

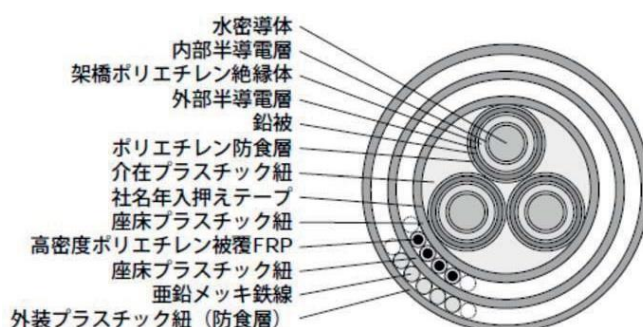


図 3.2.25 ケーブル断面図  
(出典：NEDO、2015)

なお、風車から陸上までの全体構成例を図 3.2.26 に示すが、洋上変圧施設から陸上変圧施設まで海底ケーブル（本図では 72～245kV のケーブル）を送電ケーブル、個々の風車から洋上変圧施設まで（図では 24～72kV のケーブル）をアレイケーブルと呼ぶ場合もある。

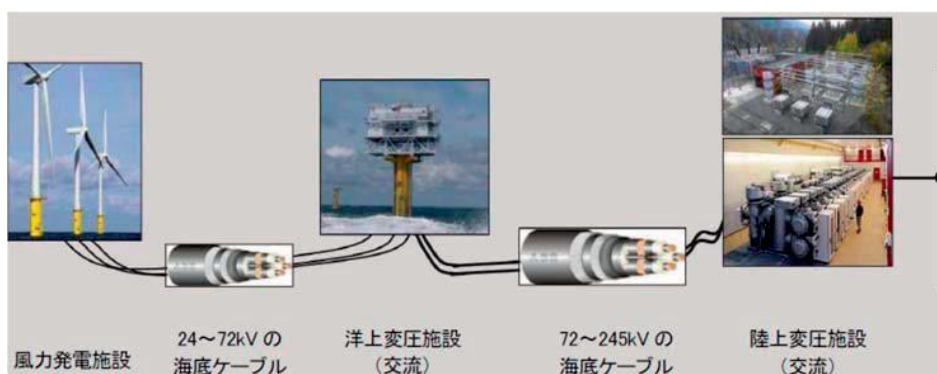


図 3.2.26 洋上風力発電施設における電力系統ライン  
(出典：日本産業機械工業会、2010)

### 第3章 洋上風力発電システム

#### (5) 洋上風車の施工に用いられる作業船

##### ① 既存の国内の作業船

洋上風車の施工に用いられる作業船として、我が国で現有の従来型の船種では、作業対象ごとに下記のような船舶がある。それぞれの典型的な姿を図 3.2.27 に示す。

- ・設置前
  - － 調査船
- ・基礎の設置
  - － クレーン船、杭打ち船、浚渫船、SEP 台船、台船
- ・風車の設置
  - － クレーン船、SEP 台船、台船
- ・電力ケーブル
  - － ケーブル敷設船
- ・メンテナンス
  - － 輸送船、作業船



図 3.2.27 作業船の種類

(出典：作業船協会ウェブサイトの図を参考に作成)

### 第3章 洋上風力発電システム

#### ② 欧州での作業船の状況

欧州では、近年、洋上風車専用の船舶が多く建造されている。その事例を写真で図 3.2.28 と図 3.2.29 に示す。また、図 3.2.30 に示すような洋上風車専用の拠点港湾も多く整備されている。



Today's equipment is inadequate:  
The equipment is either too small ...



Van Ord



Swire Blue Ocean



MPI: Discovery



FOW: Bold Tern (X2)



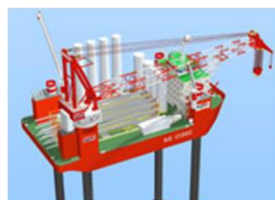
RWE: 2 vessels



MPI: Adventure



Beluga Hochtief



Seajacks: Zaratan



A2SEA: Sea Installer

図 3.2.28 洋上風車用の作業船  
(出典：井上俊司、2012)

### 第3章 洋上風力発電システム



図 3.2.29 海底ケーブル敷設船  
(出典：日本財団ウェブサイト)



HOCHTIEF CONSTRUCTION AG | CESTAM | ARUP



SLP Energy 資料



Harland and wolff HP

図 3.2.30 洋上風力発電施設の拠点港湾  
(出典：井上俊司、2012)



### 第3章 洋上風力発電システム

#### 3.2.4 維持管理

##### (1) 概要

風力発電事業者は、運転・保守を風力発電施設の資産運用、資産管理として位置づけ、そのためにメンテナンスを効率化してコスト低減を図る、あるいは逆にメンテナンスによる停止時間を少なくして発電電力量を増やし、収益を上げることを第一義的に考えている。

洋上風力発電施設の運転・保守は、陸上風力発電のそれと比べて、十分に成熟していないことに加え、気象・海象状況によってはサイトへのアクセスに制限があるため、これまで様々な形で、コストとアクセシビリティの問題や故障検知の重要性について言及されてきた。

洋上風力発電の運転・保守費用はライフサイクルコストの20～30%を占めるため、ライフサイクルを通じた資産管理が必要であり、それには発電施設の故障・事故等の不具合の原因が業界全体で共有され、周到な事業計画を立てることができる環境整備が重要である(Wills, 2014)。

機械設備の管理活動は、①運転・保守計画活動(Plan)→②運転・保守実行活動(Do)→③実績管理活動(Check)→④修正・改善活動(Action)の管理のサイクルを回しながら運転・保守の目標を目指すものとされ、設備の性能を低コストで維持することが求められている(公益社団法人日本プラントメンテナンス協会機械保全技能ハンドブック編集委員会編、1999)。

運転・保守方法の考え方は、表3.2.4に示されるように三つに分類される。予防的なメンテナンスに属するものの内、一つはコンディション・モニタリング・システム(CMS: Condition Monitoring System)を重視した遠隔監視制御システムによる方法、定期的な検査を行い不具合が検出されたら修理を行う方法、および修理整備が主体で特に常時メンテナンスを行わない方法である。

表 3.2.4 運転・保守の基本的な考え方

運転・保守の方法		内容
予防的 メンテナンス	CMS	CMSからのアラーム(データ)により風力発電施設の状態が、ある閾値を超えた場合に検査をし、不具合が検出されたら修理を行う方法(修理が先送りできる場合には定期検査時に修理)
	定期 検査	定期検査をベースに一定間隔で検査し、風力発電施設の状態に、故障に結び付く兆候が検出されたら修理を行う方法
修理メンテナンス		風力発電施設において故障が起きた時点で修理を行う方法

(出典: NEDO、2015による表を参考に作成)

風車の創成期には、修理メンテナンス(壊れるまで使う)が行われていたが、熟練者による予防メンテナンス(定期検査)、オフラインの状態監視の時代を経て、現在はオンライン状態監視の時代となっている。

### 第3章 洋上風力発電システム

以下、NEDO 着床式洋上風力発電導入ガイドブックから引用すると、  
洋上風車においては、故障事故が発生した場合、陸上に比べ現地補修作業の費用が割高になること、およびその修復により多くの時間を要し設備利用率の低下を招くことから、陸上設置とは運転・保守面で以下の相違がある。

- ・洋上の設置環境が発電設備・受変電設備に対して与える特有の環境により発電設備・受変電設備自体に陸上とは異なった運転・保守を要す（湿度、塩害対策等）。
- ・洋上用受変電設備を必要とし、これの運転・保守を配慮する必要がある（海底ケーブルや洋上変電所用の支持構造物等）。
- ・洋上設置のためアクセスが困難になることに起因して、運転・保守上特別の配慮を要す。
  - － 作業員のアクセス性が困難になる。
    - ▶ メンテナンス作業員が風力発電機の外面にアクセスする際の手段が限られる（ブレードやタワー外表面の点検時等）。
    - ▶ メンテナンス作業員の発電設備・受変電設備への到達が困難となる（時化によるアクセス船の欠航等）。
  - － メンテナンス作業用物品の輸送・吊り上げ・交換が陸上より困難となる。
    - ▶ 作業員が、風力発電機に既設の設備を利用して運搬や保守作業を行う場合にタワー内エレベーターやナセル内クレーン設備等が必要である。
    - ▶ 大物部品の交換等でタワー内エレベーターやナセル内クレーン設備が使えない場合、大型起重機船等の船舶を必要とする。

このため、洋上風力発電は陸上風力発電に比べ運転・保守に特段の配慮を要する。現在ではオンライン状態監視技術が進展し、海外の洋上風力発電では CMS の装着が認証制度の一つとなっている場合もある。ただし、警報を出す閾値の設定の難しさがあるため、定期検査と CMS の組合せによるメンテナンスが推奨されている。

#### (2) モニタリング

Tavner (2014) は、従来型の監視制御システム (SCADA: Supervisory Control And Data Acquisition) と CMS、あるいは構造ヘルスマニタリング (SHM: Structural Health Monitoring) を組み合わせたシステムの構築を提案している (図 3.2.31)。SCADA は、従来から風力発電機には装着されているシステムで、発電電力量、風向・風速、ブレードのピッチ角、ヨー角等、様々なデータが取得されているが、CMS は主軸、増速機、発電機等に振動計、ひずみ計等を取り付けて、運転パラメータの遠隔モニタリングが可能なシステムである。また、表 3.2.5 に示されるように、海外の洋上風力発電施設における CMS によるモニタリング部位も同様な主軸、増速機、発電機ブレードなどの多岐にわたっている。

### 第3章 洋上風力発電システム

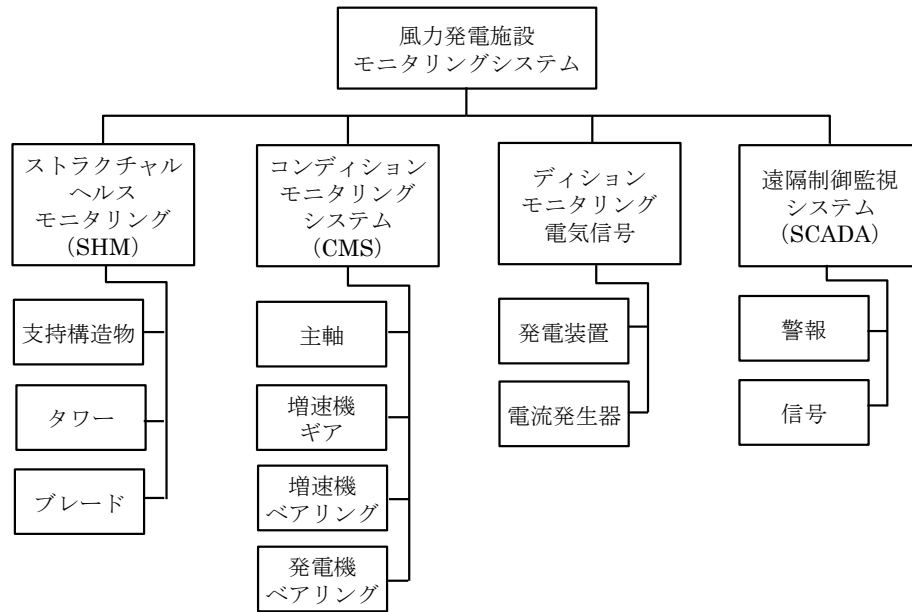


図 3.2.31 風力発電施設のモニタリングシステム  
(出典：NEDO、2015 による図を参考に作成)

表 3.2.5 海外の洋上風力発電施設におけるモニタリング部位

項目	Alpha Ventus(ドイツ)	Bard Offshore 1(ドイツ)	THORNTON BANK (ベルギー)	HORNS REV II (デンマーク)
運営機関	DOTI(Deutsche Offshore Testfeld-und Infrastruktur GnbH & Co. KG)	BARD Engineering for SudWest-Strom Windpark GmbH & Co KG and WV Energie Frankfurt	C-Power NV	DONG Energy
風車メーカー	Areva Wind	BARD	REpower	Siemens
設置基数	6	80	6	91
機種	M5000	BARD 5.0	REpower 5M	SWT-2.3.93
総出力(MW)	30	400	30	209.3
設置開始年	2007 (海底ケーブル)	2009	2008	2009.3 (風車1号機の設置)
系統連系年月日	2009.11.1	2010	2008	2009.5.1
海域	北海	北海	北海	北海
離岸距離(km)	45	89	30	27-35
水深(m)	30	39-41	17-23	9-17
CMSによるモニタリング部位	ロータベアリング、発電機、増速機、ブレード	発電機、増速機、ブレード等	発電機、増速機、メインベアリング	ベアリング、増速機、発電機

(出典：NEDO、2015)

#### (3) 定期点検

定期点検は認証された維持管理マニュアルにしたがって実施され、認証機関によって定期的に監視される。また、実務は権限を与えられた人員によって実施されなければならない。モニタリングの間隔は、全体システムの年齢や状況、部品や部材の重要度、メンテナンス手順等を勘案して決定されるが、一般的に大規模な定期点検の間隔は2年である。

支持構造物の検査記録として重要な事項は、腐食・亀裂等の構造物の強度に関わる状況、付着生物の状況、海底地盤レベルおよび洗掘の状況などが含まれる。ROV等で遠隔的に点検して異常が発見された場合にはダイバーによる確認が望ましい。

### 第3章 洋上風力発電システム

機械部品も含めて、一般的な点検項目は表 3.2.6 の通りである。

表 3.2.6 定期点検項目例

部位・部品名	点検項目
ブレード	表面損傷、クラック、構造の不連続性（目視、タッピング、超音波試験等）、ボルトの増し締め、落雷保護システムの損傷
動力伝達系（ドライブトレイン）	漏れ・染み、異常ノイズ、腐食保護の状態、グリーシング、ボルトの増し締め、歯車系の状態、落雷保護システムの損傷
ナセルと構造部品	腐食、クラック、異常ノイズ、グリーシング、ボルトの増し締め、落雷保護システムの損傷
雨水防護・防湿系、エアフィルター	機能、汚濁、泥・ほこりの付着
油圧システム、圧縮空気システム	機能、損傷、漏れ・染み、腐食
支持構造物	腐食、防食機能（カソード等）、損傷・変形、クラック、摩損、欠け、ボルトの増し締め、付着生物、モノパイル（接合部を含む）の密閉性
安全装置、外部灯火、ブレーキシステム	機能、制限値との適合性、損傷、摩耗
変電設備、開閉装置の制御システムと電機系、コンディショニングモニタリング	機能、端子部、接続部、腐食、泥・ほこりの付着
ヘリコプター・ホイスト、ボート接舷設備、防舷材	機能、締め具、腐食、損傷、クラック、変形、泥・ほこりの付着
緊急避難シェルター	機能、外部照明、バックアップ電源

（出典：Twidell T. et al., 2011 による表を参考に作成）

## 第3章 洋上風力発電システム

### 3.3 浮体式洋上風車

#### 3.3.1 支持構造形式

浮体式の洋上風力発電施設は、その構造形式を図 3.3.1 に示すように風車およびタワー、浮体構造、係留系に分けることができる。以下にその概要を示す。

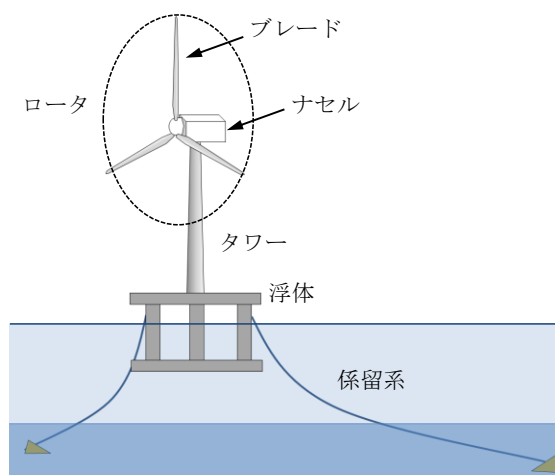


図 3.3.1 浮体式洋上風力発電施設のイメージ

#### (1) 風車およびタワー

風車およびタワーについては、陸上用および着床式洋上風力発電に用いられる施設と基本的には同等であり、大型の水平軸型風車が想定される。ただし、塩害対策としてナセルにはフィルター等が装備されている必要がある他、タワーも腐食対策がなされている必要がある。また、施工時および運用時には、ナセルやタワー等の傾斜による荷重に注意する必要がある。

近年の風車の大容量化に伴い、風車サイズも大型化しており、5MW級の大型風車を搭載した浮体の場合、海面からのハブ高さは100m程度となる。また、ナセル部の重量も300t程度とトップヘビーの構造となる。

一方、垂直軸型の風車については、近年になり1MWを超える垂直軸型風車の搭載を想定したプロジェクトが進行している(図 3.3.2)。垂直軸型風車の特徴は3.1.1(1)に示した通りであるが、浮体上に搭載する場合、波や風による浮体の動揺が回転軸に与える影響を十分に考慮しなければならない。

### 第3章 洋上風力発電システム



図 3.3.2 Twinfloat  
(出典：energiesdelamer ウェブサイト)

#### (2) 浮体構造

浮体構造は、従来の海洋開発分野と共通する技術が多く用いられている。浮体式洋上風力発電に適用される浮体形式を図 3.3.3 に、その特徴を表 3.3.1 に示す。

表 3.3.1 浮体式洋上風力発電の代表的な浮体形式

浮体形式	特徴	メリット	デメリット
セミサブ (Semi-submersible)	複数の円柱系部材（コラム）が水線面を貫き、コラム同士はデッキやハルで接続する構造。	波から受ける外力が小さく、動揺しにくい。 岸壁やドックで風車まで据え付けられる。	構造が複雑になり、建造コストが大きくなりやすい。
スパー (Spar)	長大な円筒形の構造。没水部よりも水線部を細くし、外力をより小さくする場合もある。	構造が単純なため、本体の建造コストが小さくなりやすい。 波から受ける外力が小さく、動揺しにくい。	喫水が大きいため、水深の大きい設置海域が必要となる。 浮体や風車の設置時に立て起し等の処理が必要となることがある。
ポンツーン (Pontoon)	箱状の構造	構造が単純なため、建造コストを小さくすることができる。 岸壁やドックで風車まで据え付けられる。	水線面積が大きく、波浪の影響を受けやすい。
TLP (Tension Leg Platform)	強制的に半潜水させた浮体と海底に設置された基礎とを鋼管で接続し、浮力によって生じる緊張力を利用して係留する。	浮体動揺が小さい。	コストが高い。 地震発生時の安全性に考慮が必要。

### 第3章 洋上風力発電システム



図 3.3.3 浮体式洋上風力発電の浮体形式  
(出典：(左から順に) 福島洋上風力コンソーシアムウェブサイト、IDEOL 社ウェブサイト、提供・海上技術安全研究所、BlueH Engineering 社ウェブサイト)

構造材料としては船舶や海洋構造物と同様の鋼材が多く用いられるが、環境省浮体式洋上風力発電実証事業のようにコンクリートとのハイブリッド構造や、IDEOL 社のようにコンクリート製の浮体もある。

#### (3) 係留系

浮体の位置保持には、従来の海洋構造物と同様の係留技術が用いられる。

図 3.3.4 および表 3.3.2 に代表的な係留方式およびその特徴を示す。

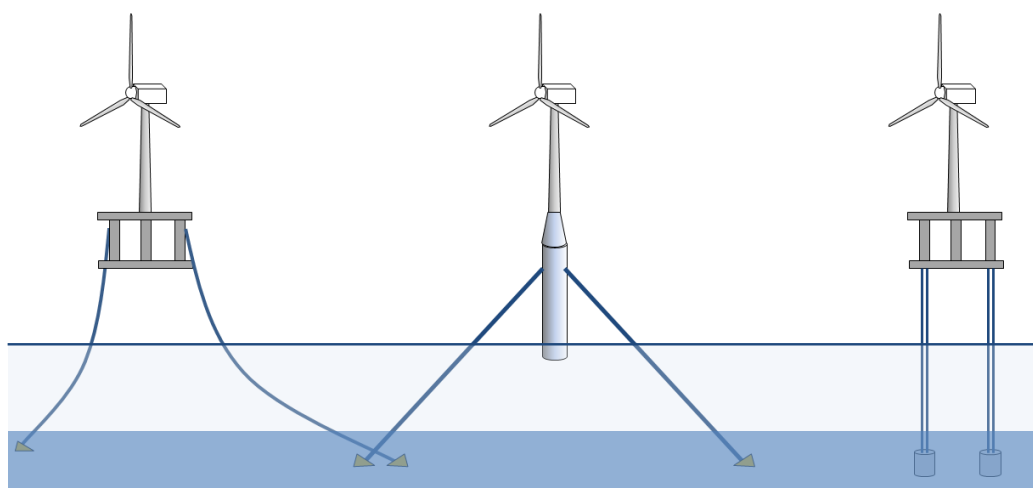


図 3.3.4 代表的な係留方式 (左：カタナリ、中：トート、右：TLP)

### 第3章 洋上風力発電システム

表 3.3.2 代表的な係留方式

係留方式	特徴	メリット	デメリット
カテナリ (Catenary)	海底のアンカーと浮体を懸垂線状（カテナリ）になった、主として鋼製チェーンで係留する方法。	実績が豊富。 多様な水深に対応可能。	水深が小さい場合は係留設計が困難になる。 チェーン本数が増えると浮体重量や設置コストの増加につながる。 展開面積が大きい。
トート (Tout)	合成繊維索を用い、初期張力を調整して索の伸びにより係留力を得る方法。	係留索の重量がチェーンよりも軽いため、より大水深に適用しやすい。 係留展開面積をカテナリ係留よりも小さくすることができる。	アンカーは水平方向と鉛直方向の2種類に対抗する把駐力を保持しなければならない。 係留索は浮体運動を過剰に拘束しないよう十分な弾性を有しなければならないが、かつコストが高い。
TLP (Tension Leg Platform)	海底と浮体を鋼製のテンドンで接続し、浮体を強制的に沈めて得られる浮力によりテンドンに発生する張力により係留する方法。	浮体運動を極めて小さくすることができる。 係留展開面積を浮体面積とほぼ同等にすることができる。	設置コストが高い。

海底石油・ガス開発に用いられる従来の海洋構造物の係留と比較して

- ①係留本数が少なくなりやすい
- ②設置水深が比較的浅い

という相違点が挙げられる。これは、①については発電施設が常時無人であることが想定されていることと、建造コストおよび設置コストをできる限り低減させる必要があるためである。②については離岸距離がそれほど大きくないため、従来の海洋構造物と比較して水深も小さい海域に設置されることが考えられるが、一般的なカテナリ係留では水深が小さくなると設計の困難さが増加する。

海底に設置され、係留索あるいは係留チェーンを保持するアンカーには、表 3.3.3 に示すものが多く用いられている。また、代表的アンカーを図 3.3.5 に示す。



### 第3章 洋上風力発電システム

表 3.3.3 代表的なアンカー

アンカー	特徴	メリット	デメリット
ドラッグ (Drag) アンカー	主にカテナリ係留に用いられる。海底下に貫入しチェーンの方向への引き抜きに把駐力を発揮する。	設置コストが小さい。	逆向きおよび鉛直方向の把駐力は小さい。
サクション (Suction) アンカー	海底に設置した円筒内の圧力を下げて海底に埋没させ、把駐力を得る。	高い把駐力を得ることができる。	適用性は海底地盤による。重量が大きく起重機船を必要とする場合がある。
落下式 (Dropping) アンカー	円筒状のアンカーを落下させ、その運動エネルギーで海底下にアンカーを埋没させて把駐力を得る。	設置が容易で、コストが小さく、高い把駐力を得ることができる。設置にかかる時間も短い。	斜めに貫入する可能性がある。流れにより目標から外れることがある。
VLA (Vertical Load Anchor)	平板状のアンカーに対し海底面を引きずることで海底下に貫入させて把駐力を得る方法。ドラッグアンカーよりも深く貫入する。	小さく軽いアンカーで高い把駐力を得ることができる。把駐力は鉛直方向にも働く。	設置に複数の AHV や ROV が必要となる。設計通りに設置されたかどうか確認が難しい。
重力式 (Gravity) アンカー	コンクリート等の重錘の自重と海底面との摩擦により把駐力を得る方法。	コストが小さく、設置が容易。	高い把駐力を得るため重錘を大型化する必要がある。

AHV : Anchor Handling Vessel、アンカーハンドリング船（アンカー設置を行うための作業船）

ROV : Remotely Operated Vehicle、遠隔操作無人潜水機

### 第3章 洋上風力発電システム

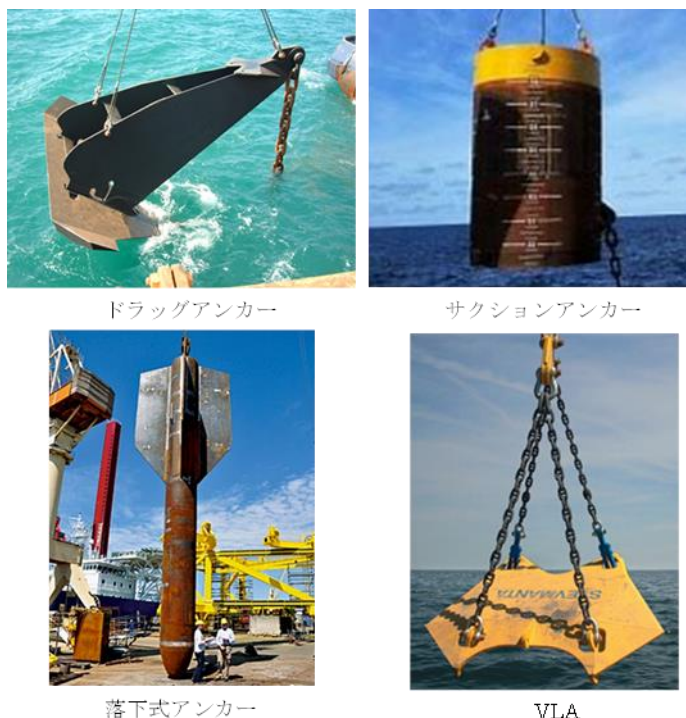


図 3.3.5 代表的なアンカー  
 (出典：(左上・右下) NAUTICEXPO 社ウェブサイト、(右上) SEMAR 社 ウェブサイト、  
 (左下) Norwegian Geotechnical Institute (NGI) ウェブサイト)

浮体とアンカーとを接続するチェーン、あるいはワイヤーについては、表 3.3.4 に示すものの使用が想定されている。それぞれの特徴を示す。

表 3.3.4 代表的な係留索

索鎖	特徴	メリット	デメリット
チェーン	いわゆる鋼製の鎖 等級により性能が細かく規定されているが、グレード3以上の物が使用されることが多い。	使用実績が豊富。製造コストも小さい。	重量が大きく、大水深時には浮体重量や設置コストの増加につながる。
ワイヤー	鋼製のワイヤーロープ	強度が同程度のチェーンよりも軽い。	耐食性に劣る。 損傷部の補修・交換が困難。
合成繊維索	ポリエステル系、ポリアミド系、アラミド系等の種類がある。	バネ定数が小さく、トート係留では浮体運動を強く拘束しない。	浮体式風力発電での使用実績はまだない。 コストが高い。

### 第3章 洋上風力発電システム

#### 3.3.2 浮体特有の安全性

設計の基本的な考え方は、想定される条件下において十分な安全性を確保すること、また所要の安全性を前提として、建造コストや維持管理コストを低減することである。ここでは、安全性に大きく影響する要因について中心に記述する。

##### (1) 荷重

###### ① 風車に働く荷重

風車に働く主な荷重は、発電状態においてはスラストおよびトルク、待機状態においては風荷重である。ブレードに働くこれらの荷重は、3.1.1(5)に示す翼素運動量理論等により求めることができるが、ドライブトレイン（発電機やギヤボックス）、タワー等の風車の全体システムに働く荷重についても詳細に解析する必要がある。

また、風車は発電量を安定化させるため、ブレードピッチ制御や発電機制御を行うが、これらの制御により発生する繰り返し荷重も考慮した疲労解析を行う必要がある。

このような解析を行うシミュレーションツールには市販、オープンソースを含め複数のソフトウェアが存在する。ただし、全てのツールが風車の認証用に認められているわけではない。風車の認証用に認められているツールでは、スラスト荷重やトルク荷重に加え、ブレードの根元、各種ベアリング、発電機シャフト、ギヤ等に働く荷重、さらに発電量を求めることができる。

また、地形の影響を考慮して、ウィンドファーム内のより最適な風車配置を求めるソフトウェアや、騒音を解析するソフトウェア等も存在する。

主な解析ソフトウェアを表 3.3.5 に示す。

表 3.3.5 主な解析ソフトウェア

解析ツール	主目的	開発者
Bladed	風車設計・性能評価	DNV GL
FAST	風車設計・性能評価	NREL
Flex	風車設計・性能評価	DTU
HAWC2	風車設計・性能評価	DTU/Risø
WAsP	風況シミュレーション	Risø
WindSim	風況シミュレーション・ウィンドファーム設計	Vector AS
openWind	環境影響評価	AWS Truepower

DTU : Delft University of Technology

Risø : Risø national laboratory for sustainable energy

###### ② 波浪荷重の評価手法

浮体の没水部分には、重力、浮力、潮流力、波力等の様々な力が働くが、海洋構造物

### 第3章 洋上風力発電システム

の安全性に大きく影響するものとして、本項では波力について解説する。

実際の海洋の波は複雑な不規則波であるが、多様な波高、周期、波向を有する規則波が組み合わされたものと見なすと、波浪荷重の取り扱いはより容易になる。以下、規則波中の波浪荷重について記述する。

規則波は、時間的、空間的に一定の周期と振幅を持つ正弦波であり、次式のように表すことができる。

$$\eta = h \cos(\kappa x - \omega t) \quad (3.3.1)$$

ただし、 $\eta$  は水面高さ、 $h$  は波の振幅、 $\kappa$  は波数、 $x$  は波の進行方向座標、 $\omega$  は波の角周波数、 $t$  は時間である。

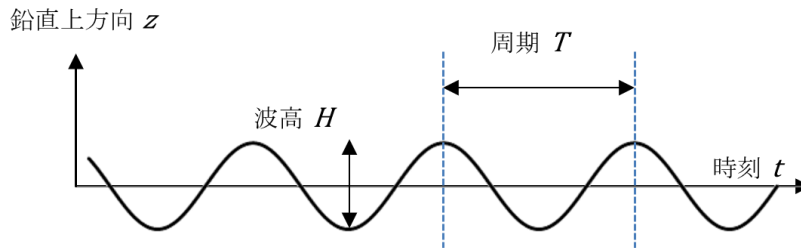


図 3.3.6 波の諸量の定義

波を大水深の微小振幅進行波と仮定する。流体は非粘性・非圧縮であり、渦無し流れと仮定され、このような場合、速度ポテンシャルを用いて流体を表現することができる。入射波の速度ポテンシャル  $\phi_0$  は、次式のように表すことができる。

$$\phi_0 = -\frac{\omega h}{\kappa} e^{\kappa z} \sin(\kappa x - \omega t) \quad (3.3.2)$$

ただし、 $z$  は静水面 0 をとする鉛直上向きの座標である。

速度ポテンシャルの導入により、水中の任意の点の圧力、水粒子速度、加速度を求めることができ、それぞれ式 (3.3.3) ~ (3.3.7) のように表現することができる。

$$p = -\rho g z + \rho \frac{\partial \phi_0}{\partial t} = -\rho g z + \rho g h e^{\kappa z} \cos(\kappa x - \omega t) \quad (3.3.3)$$

$$v_x = \frac{\partial \phi_0}{\partial x} = -\omega h e^{\kappa z} \cos(\kappa x - \omega t) \quad (3.3.4)$$

$$a_x = \frac{\partial^2 \phi_0}{\partial x \partial t} = \omega^2 h e^{\kappa z} \sin(\kappa x - \omega t) \quad (3.3.5)$$

$$v_z = \frac{\partial \phi_0}{\partial z} = -\omega h e^{\kappa z} \sin(\kappa x - \omega t) \quad (3.3.6)$$

$$a_z = \frac{\partial^2 \phi_0}{\partial z \partial t} = \omega^2 h e^{\kappa z} \cos(\kappa x - \omega t) \quad (3.3.7)$$

ただし、 $p$  は圧力、 $v_x$  および  $v_z$  は水粒子の  $x$  方向および  $z$  方向の速度、 $a_x$  および  $a_z$  は水粒子の  $x$  方向および  $z$  方向の加速度である。

これらを用いて波による力を評価するには、主に以下の2種類の考え方をを用いることができる。

- ・物体（浮体構造物）の存在や動揺に伴う速度ポテンシャルの変化を推定し、物体表面の圧力分布を積分して力を求める手法。一般にポテンシャル理論による方法とも呼ばれる。
- ・物体（浮体構造物）の存在や動揺に伴う速度ポテンシャルの変化は微小であると仮定し、水粒子の速度・加速度を用いて構造物を構成する部材（細長部材）に働く力を求める手法。一般にモリソン（Morison）式による方法とも呼ばれる。

a) ポテンシャル理論による波力の評価法

物体を固定した場合に入射波により作用する力を波強制力と呼び、波強制力を求める変動圧力は入射波圧と反射波圧である。入射波圧とは、浮体が存在しない状態で、浮体が存在した時の仮想的な浮体没水部の表面の位置における水圧変動である。波強制力が入射波圧の積分のみで表されるとする仮定をフルード・クリロフ（Froude-Krylov）の仮定とよび、入射波圧による力をフルード・クリロフ力と呼ぶ。反射波圧とは、浮体を波浪中に固定した場合に発生する水面変動から入射波の変動を差し引いた水圧変動で、その積分をディフラクション（diffraction）流体力と呼ぶ。

一方、物体が入射波によって動揺するとき、水面下の物体表面には浮力を生じる静水圧に加え、さらに変動圧力が発生する。この変動圧力に基づく動的な流体力をラディエーション（radiation）流体力という。

すなわち、物体に働く力は、次のように分類される。

- ①重力
- ②慣性力
- ③浮力
- ④ディフラクション流体力
- ⑤フルード・クリロフ力
- ⑥ラディエーション流体力

④と⑥の和を波強制力という。また、ラディエーション流体力のうち、運動の加速度に比例する成分を付加慣性力、運動の速度に比例する成分を造波減衰力とも言う。ラディエーション流体力や波強制力を求めるには、境界要素法（BEM：Boundary Element Method）や有限要素法、特異点分布法などを用いて数値的に算出するシミュレ

### 第3章 洋上風力発電システム

ーションツールが複数開発されている。

#### b) モリソン式による波力の評価法

モリソン式とは、海底に固定された鉛直柱に作用する波強制力を求めるための数式であり、円柱の単位長さ当たりの $x$ 方向の力 $f_M$ は次式のように表される。

$$f_M = \frac{1}{2} C_D \rho D v_x |v_x| + C_M \rho A a_x \quad (3.3.8)$$

ただし、 $C_D$ は抗力係数、 $D$ は円柱の直径、 $C_M$ は質量力係数、 $A$ は円柱の断面積である。

海洋構造物の場合、構造部材が鉛直であるとは限らないこと、物体の運動に伴う流体力もモリソン式のように記述できれば都合が良いため、部材の中心軸を任意の方向に設定可能で運動を伴う細長部材にも適用できる、修正モリソン式が広く用いられている。円柱部材に対する修正モリソン式による部材直交方向の流体力 $f_{MM}$ は次式のように表される。

$$f_{MM} = \frac{1}{2} C_D \rho v_r |v_r| + \rho A \{ (C_M - 1) \dot{v}_r + \dot{v} \} \quad (3.3.9)$$

ただし、 $v_r$ は水粒子と部材の相対速度の直交方向成分、 $\dot{v}_r$ は水粒子と部材の相対加速度の直交方向成分、 $\dot{v}$ は水粒子加速度の部材直交方向成分である。

修正モリソン式により求められる力は部材直交方向の力であるので、浮体全体への適用の際は、空間座標の定義を考慮して座標変換を行う必要がある。また、部材端面において軸方向へ働く力は考慮されていないので、付加水影響を付与する等、適宜工夫が必要である。より正確に評価するためには、ポテンシャル理論も併用することが望ましい。

モリソン式は細長部材へ適用されるものであり、十分に喫水の大きなスパー型浮体への適用には実用的な解が得られると考えられる。しかし、セミサブ型浮体や、断面積が深さで変化する、いわゆるアドバンスト・スパー型浮体等においても適用可能であるかどうかは注意すべきであろう。また、部材の断面積や抗力係数が算出結果に大きく影響するため、実際の海水環境下においては付着生物による見かけ上の投影面積や断面積の増加にも注意する必要がある。

#### ③ 係留システムの解析手法

海洋構造物に用いられる係留システムのうち、トート係留やTLPといった方式は、浮体と海底に設置されたアンカーがほぼ直線状に接続されており、用いられている係留ワイヤーやテンドンのバネ定数が分かっているならば、線形バネとして近似することで係留による復原力を求めることができる。一方、カテナリ係留の場合、係留により浮体を拘束する力は小さく、波浪や潮流による浮体の変位は大きくなる。その復原力は非線形性が大きく、解析時に注意する必要がある。

解析は、静的な手法と動的な手法に大別できる。静的な手法ではカテナリ理論を用い

### 第3章 洋上風力発電システム

るもの、動的な手法ではランプドマス法 (lumped mass method)、FEM が代表的である。

#### a) カテナリ理論による静的解析手法

図 3.3.7 のように係留索が懸垂線状 (カテナリ) になった状態について、それぞれのパラメータは以下の通り定義される。

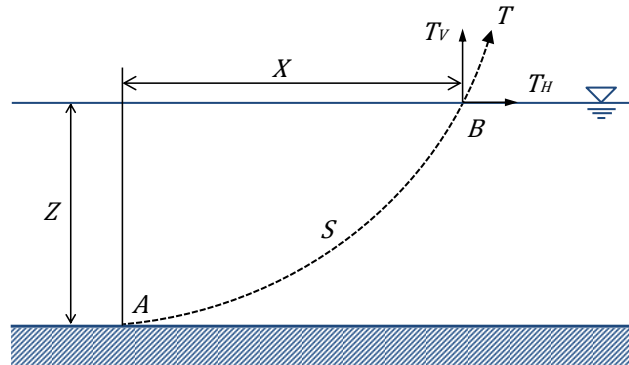


図 3.3.7 カテナリ係留の形状定義  
(出典：飯島一博等、2013 による図を参考に作成)

$$S = \sqrt{Z^2 + 2aZ} \quad (3.3.10)$$

$$Z = a \left( \cosh\left(\frac{X}{a}\right) - 1 \right) \quad (3.3.11)$$

$$X = a \cosh^{-1}\left(\frac{Z}{a} + 1\right) \quad (3.3.12)$$

$$T^2 = T_H^2 + T_V^2 \quad (3.3.13)$$

$$T_V = wS \quad (3.3.14)$$

$$a = \frac{T_H}{w} \quad (3.3.15)$$

ただし、 $S$  はカテナリ部分の長さ、 $w$  は単位長さ当たりの係留索重量、 $T$  は張力、 $T_H$  および  $T_V$  は点  $B$  における水平方向張力および鉛直方向張力である。

上式中の双曲線関数の中と外の両方に同じ変数  $a$  があることから、厳密解を求めることはできず、数値的に解くことになる。

#### b) ランプドマス法による動的解析手法

図 3.3.8 のように係留ラインをバネ定数  $k$  と質量  $m$  をもつ  $n$  個のバネ要素と  $(n-1)$  個の質点として模擬する。





### 第3章 洋上風力発電システム

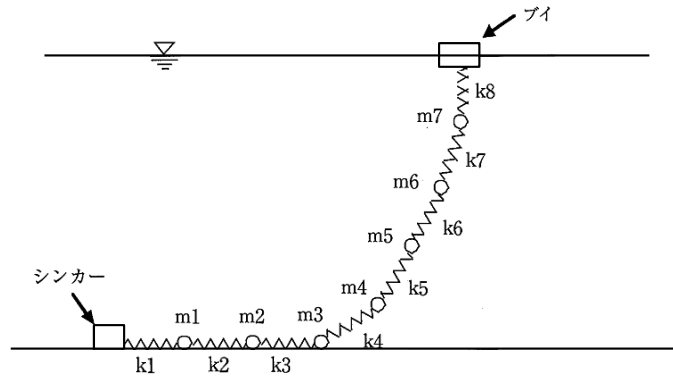


図 3.3.8 ランプドマス法のご概念  
(出典：飯島一博等、2013 による図を一部改変)

質点の位置ベクトルと各質点間の張力を以下の次式のように定義する。

$$P_i n_i + F_i - P_{i-1} n_{i-1} = 0 \quad (3.3.16)$$

$$X_i = X_{i-1} + x_{i-1} \left( 1 + \frac{P_{i-1}}{A_{i-1} E_{i-1}} \right) n_{i-1} \quad (3.3.17)$$

ただし、 $F_i$ は*i*番目の質点に働く外力ベクトル、 $n_i$ は*i*番目のバネの方向ベクトル、 $P_i$ は*i*番目のバネの張力、 $X_i$ は*i*番目の質点の位置ベクトル、 $x_i$ は*i*番目のバネの自然長、 $A_i$ は*i*番目のバネの断面積、 $E_i$ は*i*番目のバネのヤング率である。

係留ラインに作用する流体力を考慮した次の運動方程式を解くことで時刻歴の張力変動を求めることができる。

$$(M_j + A_{nj} \sin^2 \gamma_j + A_{tj} \cos^2 \gamma_j) \cdot \ddot{x}_j + (A_{tj} - A_{nj}) \cdot \ddot{z}_j \sin \gamma_j \cos \gamma_j = F_{xj} \quad (3.3.18)$$

$$(M_j + A_{nj} \cos^2 \gamma_j + A_{tj} \sin^2 \gamma_j) \cdot \ddot{x}_j + (A_{tj} - A_{nj}) \cdot \ddot{x}_j \sin \gamma_j \cos \gamma_j = F_{zj} \quad (3.3.19)$$

( $n = 2, 3, \dots, N$ )

ランプドマス法では、係留索を複数の要素で模擬するため、中間シンカーや中間ブイを用いた係留や複数種類の索・チェーンを組み合わせた係留系の解析にも適用しやすい手法といえる。

#### ④ 連成解析手法

浮体式風力発電における荷重評価においては、支持基盤である浮体が波浪や風により動揺すると、浮体動揺が風車の相対風速を変化させ、風車に働く風荷重に影響する。一方、風車に働く風荷重は浮体運動にも影響するため、風車に働く風荷重の変化は浮体の運動を変化させる。このような浮体運動と荷重の複雑な関係は、いわゆる連成問題として知られており、荷重および浮体運動の評価の際は、連成影響を精度良く見積もる必要がある。

図 3.3.9 に連成問題の解析フローの例を示す。ある時刻において、空力荷重、波浪荷重、潮流荷重をそれぞれ求め、それらによる浮体運動と運動に伴う荷重の変化に係る収

### 第3章 洋上風力発電システム

束判定を行い、次の時刻に進むという流れである。

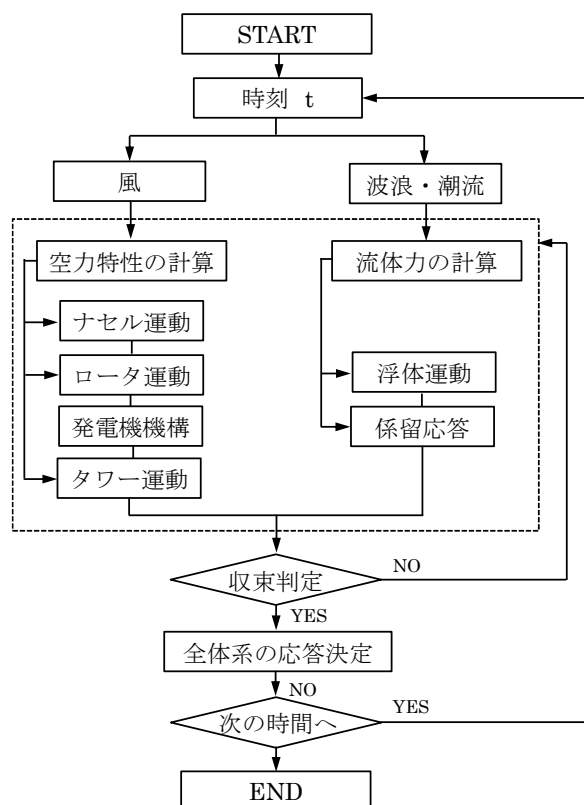


図 3.3.9 連成解析のフロー図

#### ⑤ 水槽模型試験手法

数値シミュレーションは性能や安全性の検証に非常に有用ではあるが、縮尺模型を用いた水槽試験も同様に有用である。ただし、通常は試験施設の寸法、水槽占有期間や費用の面で制約があるため、目的に応じた模型の製作、試験項目の選択が重要となる。

模型試験の目的は、一般的には設計コンセプトの妥当性の確認や最適化、シミュレーションツールの精度検証等である。例えば、IEA Wind Task30 OC5 (Offshore Code Comparison Collaboration Continuation with Correlation) では、シミュレーションツールの精度検証を図 3.3.10 の形式の風力発電施設を対象に実施している。

### 第3章 洋上風力発電システム

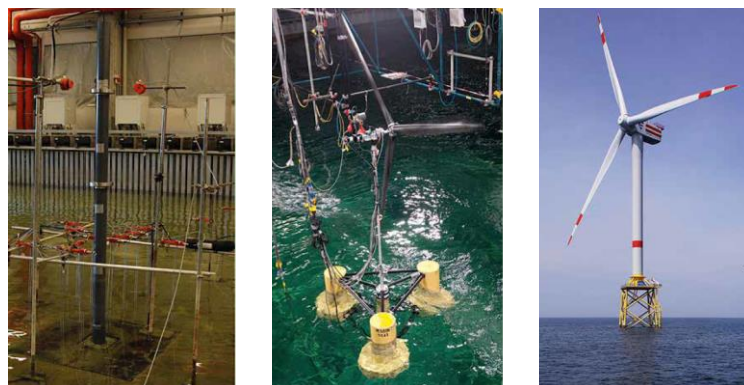


図 3.3.10 OC5 における検討対象  
(左：スパー型浮体式、中：セミサブ型浮体式、右：ジャケット型着床式)  
(出典：IEA、2014)

模型試験を実施する上での留意点を以下に記述する。

模型試験が正しく実施されるためには、模型が実機を正確に再現できていることが必要であり、それはすなわち正しい相似則を満たしていることが必要である。ただし、試験の対象となる事象に関連する相似則を全て満たすことは不可能であるため、満たすべき相似則を取捨選択することになる。

浮体式洋上発電施設で重要な相似則を、表 3.3.6 に示す。

表 3.3.6 代表的な相似側

相似則	定義	関係する物理量	対象
フルード数 (Froude number)	$Fr = \frac{V}{\sqrt{gl}}$	重力と慣性力の比	風荷重
レイノルズ数 (Reynolds number)	$Re = \frac{Vl}{\nu}$	粘性力と慣性力の比	空力特性
マッハ数 (Mach number)	$Ma = \frac{V}{a}$	流速と音速の比	空力特性
ストローハル数 (Strouhal number)	$St = \frac{fD}{V}$	慣性力とバネの弾性力の比	振動
周速比 (tip speed ratio)	$\lambda = \frac{2\pi Rn}{V}$	風速とブレード先端速度の比	風車性能

ただし、

$V$  : 流体の速度

$l$  : 対象の物体の代表長さ

$\nu$  : 動粘性係数

$a$  : 空気中の音速

$R$  : ロータの回転半径

$n$  : ロータの回転数

### 第3章 洋上風力発電システム

表に示したものの以外にも、幾何学的な形状を相似にすること、質量を相似にするとともに、重心高さや慣動半径を相似にすることも浮体運動の検証において重要である。

図 3.3.11 に示すような浮体式洋上発電施設全体の波浪中応答や安全性を検証する場合、波高は縮尺に応じて定められ、浮体変位や索張力等を計測する。例えば風による定常傾斜角や待機時の風荷重については、風車の幾何学的形状が正確に模擬されていればフルード則に従った風速を加えることで計測可能である。

また、翼の揚力係数等の空力に焦点を当てる場合には、レイノルズ数を合わせることも望ましく、そのためにはロータ回転数や風速がかなり大きくなる。ただし、水槽試験においては一般的に空気のレイノルズ数を合わせることは困難である。

発電時の浮体応答を検証する場合、縮尺によっては風車の回転数や発生するスラスト荷重等の特性を模擬できないため、模型に入力する風速をフルード則で定めることは不適である。その場合、想定実機の発生する発電時荷重を縮尺して、重錘や入力風速を調整することで加重することとなる。



図 3.3.11 水槽模型試験の様子（ロータ直径：165cm）  
（出典：海上・港湾・航空技術研究所海上技術安全研究所提供）

#### (2) 復原性 (stability)

大型風車はナセル質量が数百 t 以上、海面上のハブ高さが 100m にもなる。大きな風荷重が長いモーメントレバーに働くため、転倒モーメントには十分注意する必要がある。

復原性の確認は、図 3.3.12 に示す復原力曲線によって行う。この図は横軸に傾斜角を取り、縦軸に浮体の有する復原力として復原モーメントを取ったもので、例えばセミサブ型浮体の場合、面積  $(A+B) \geq 1.3 \times$  面積  $(B+C)$  を満足しなければならない。ただし、傾斜角は  $\theta_2$  までとする。また、最大傾斜時にブレードの下端が水面と接触してはならない。

図 3.3.13 にセミサブ型の浮体式洋上風力発電における解析結果の例を示す。

### 第3章 洋上風力発電システム

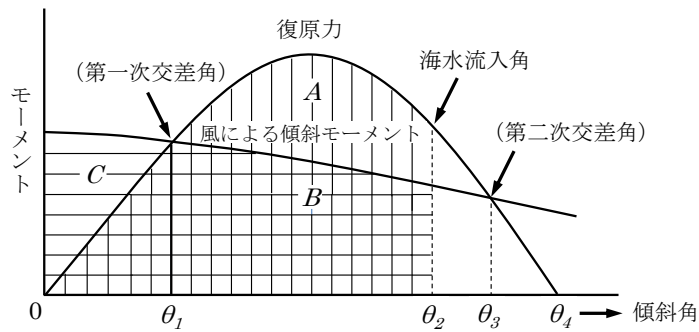


図 3.3.12 復原力曲線  
(出典：国土交通省、2012 による図を参考に作成)

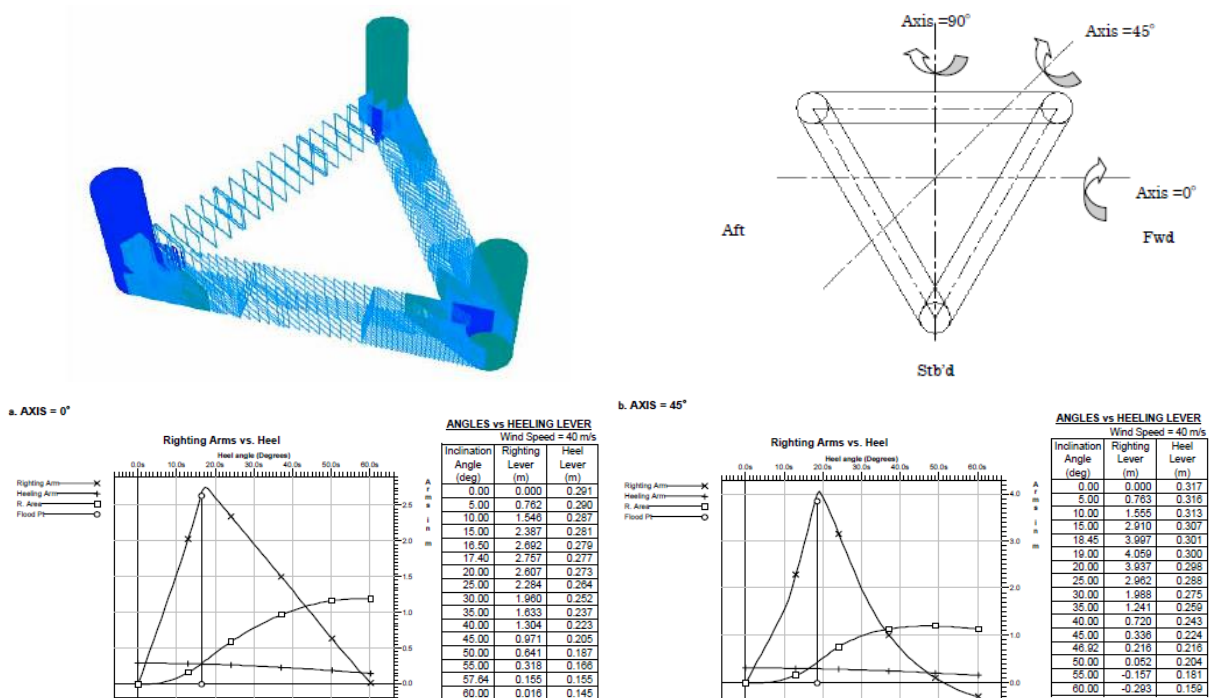


図 3.3.13 セミサブ型浮体の復原性解析の例  
(出典：国土交通省、2014)

なお、浮体に破口が生じ、一部区画が浸水したために復原力が減少した状態においても、復原力の確保がなされていなければならない。

#### (3) 制御

風車は発電量の安定化と高効率化を目的に、変動風速に対してブレードや発電機の制御を行っている。制御方式は風車の発電容量やメーカーにより様々であるが、大型風車では、ブレードピッチ制御と可変速制御を組み合わせたことが一般的である。

ブレードピッチ制御は、定格風速よりも大きな風速において、風を逃がすようにブレード角を変化させ、回転数や出力を一定に保つ制御である。しかし、浮体式風車に陸上風車と同じ制御を行うと、風車制御系と浮体動揺の連成を原因とする動揺が発生する可能性が

### 第3章 洋上風力発電システム

ある。これは風車に働くスラスト力が浮体式風車の前後揺れ (surging) や縦揺れ (pitching) に対して空気力学的にマイナスの減衰力として作用することが原因のため、ネガティブ・ダンピング現象 (negative damping phenomenon) と呼ばれる。

図 3.3.14 にネガティブ・ダンピングの発生原理を示す。ブレードピッチ制御は、相対風速の低下に対してはスラスト力を増加させ、相対風速の上昇に対してはスラスト力を減少するように作用する。浮体式風車が後傾すると、相対風速が減少するため、スラスト力を増加させるように制御が働く。その結果、より浮体式風車が後傾し、不安定性が増す。

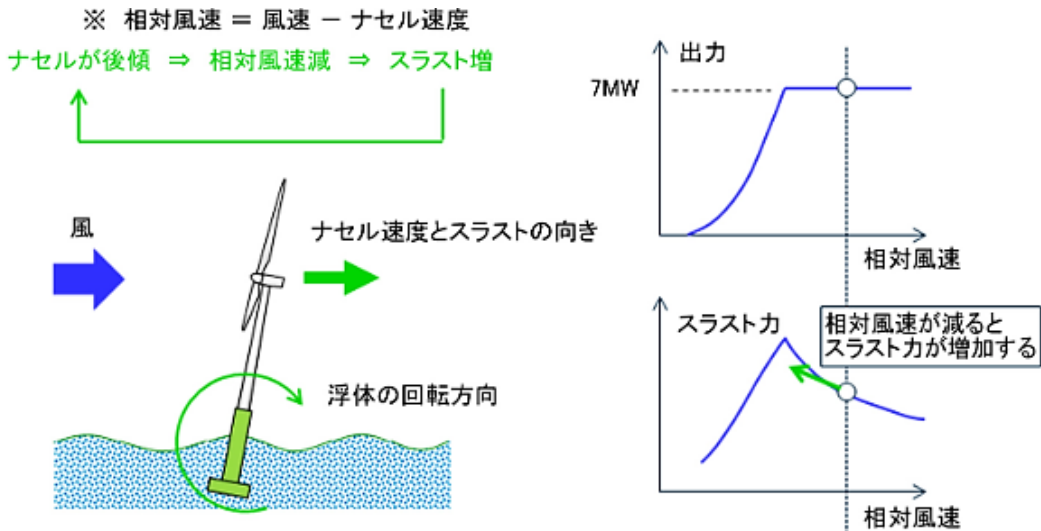


図 3.3.14 ネガティブ・ダンピングの発生原理  
 (出典：中村昭裕等、2015)

このような運動が励起されると、風車回転数の変動が大きくなり、平均的にも風が斜めから当たることになって発電量が落ちる。また、タワー基部の曲げモーメントが増加する等、安全性の点でも悪影響を及ぼすことになる。風車回転数の変動と浮体の縦運動をともに適切に抑制するブレードピッチ制御手法は徐々に明らかになっているところである。

ブレードピッチ制御は、古典制御の一種である PID 制御 (Proportional Integral Differential control、目標値からの偏差、積分値・微分値を減少させる制御法) や PI 制御 (微分制御を省略) を用いるものが多いが、制御ゲイン (control gain、偏差に対する係数) 等の詳細はメーカーのノウハウとなっており、公開されていない。制御を加えた場合と制御を加えない場合の比較の例を図 3.3.15 に示す。

図 3.3.15 は上段より発電量、ロータ回転数、ブレードピッチおよび浮体の縦揺 (ピッチ) を示しており、浮体の縦揺を小さくするように制御を加えた場合 (図中、赤線) と制御を加えていない場合 (青線) を比較した結果である。

### 第3章 洋上風力発電システム

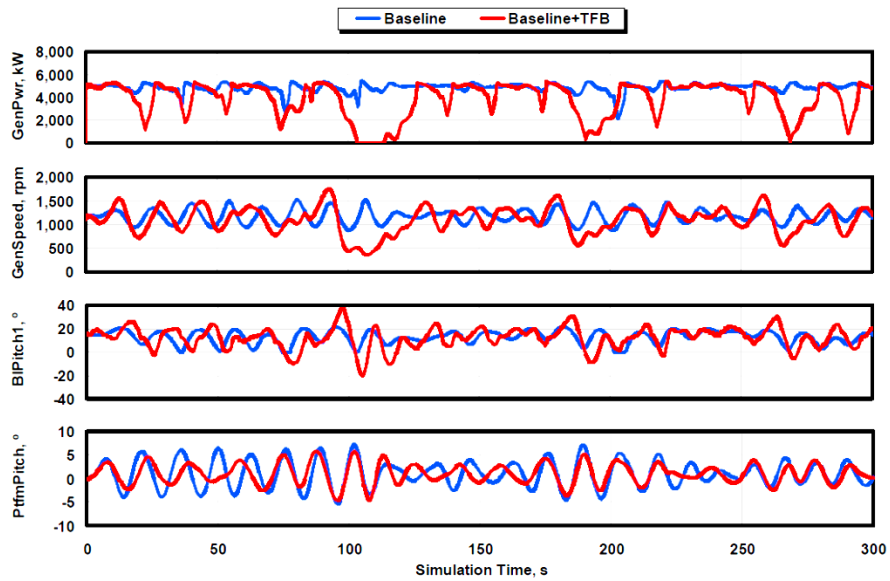


図 3.3.15 制御による風車特性への影響  
(出典 :Jonkman, J.M., 2008)

#### 3.3.3 設置工事

##### (1) 施工手順

浮体式洋上風力発電の施工手順の概要を図 3.3.16 に示す。ただし、浮体形式によって手順は大きく異なることが考えられる。例えば、スパー型では喫水が大きいため、設置海域またはその付近の静穏な海域での浮体建て起こしが必要となり、タワー設置や風車の搭載はその後の工程となる。一方、セミサブ型ではドック付近でのタワー設置や風車の搭載が可能となる場合が考えられる。ただし、その後の曳航作業に橋梁等の障害物があればタワー設置や風車の搭載は、浮体を曳航し障害物を通過した後に設置海域、またはその付近の静穏な海域での作業となる。

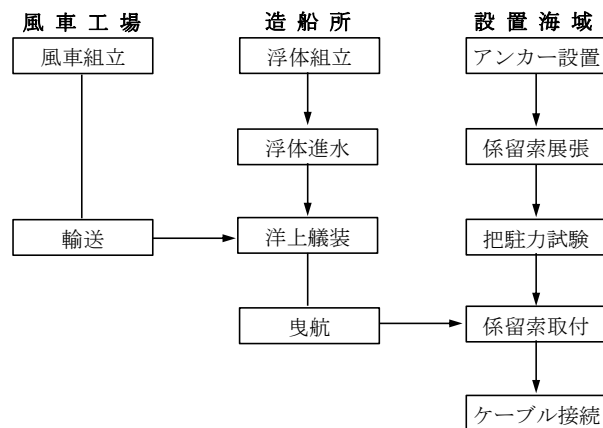


図 3.3.16 施工手順のフロー

### 第3章 洋上風力発電システム

一例として、世界で初めて大型風車を搭載した浮体式洋上風力発電施設である Hywind (ノルウェー) の設置手順を図 3.3.17 に示す。

- (a) : スパー型浮体部を横倒し状態で曳航
- (b) : 静穏なフィヨルド内で着底させる
- (c)~(d) : タワーを搭載
- (e)~(f) : ロータの取付け
- (g) : 完成した施設を設置サイトまで曳航



図 3.3.17 浮体式風車の曳航と設置の様子 (Hywind の例)  
(出典 : NEDO、2015)

また、図 3.3.18 にセミサブ型浮体の曳航時の船団を、図 3.3.19 に係留設置時のイメージを示す。

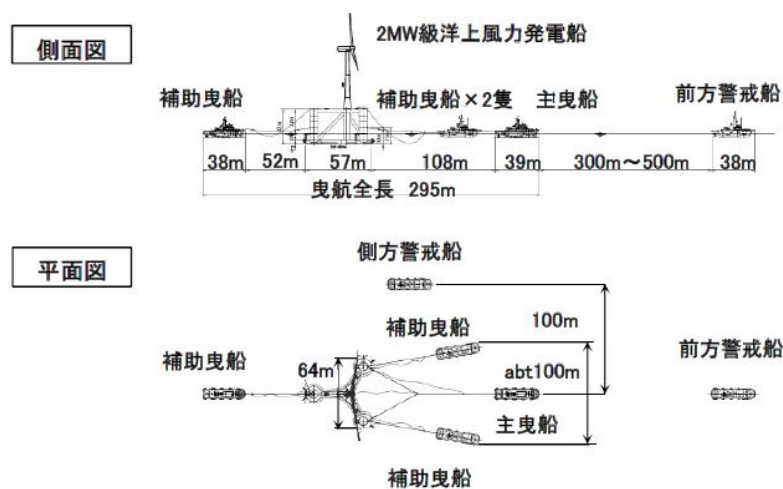


図 3.3.18 曳航船団のイメージ  
(出典 : 福島洋上風力コンソーシアム、2013)



### 第3章 洋上風力発電システム

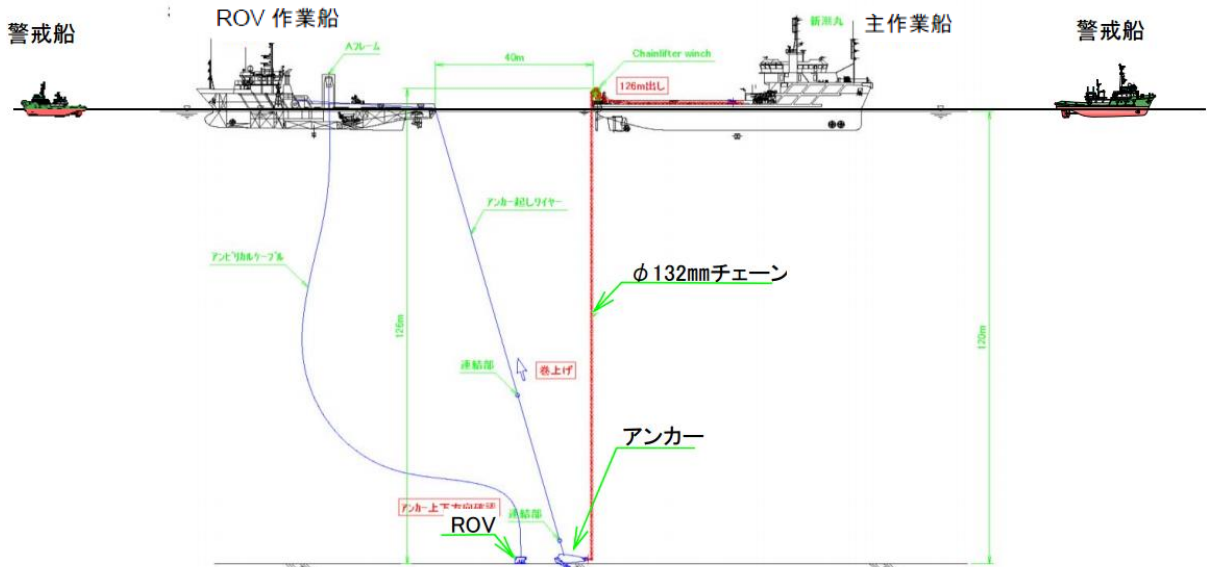


図 3.3.19 アンカー設置作業のイメージ  
(出典：福島洋上風力コンソーシアム、2013 による図を一部改変)

#### (2) 要素技術

送電ケーブルは、風車を搭載した浮体と陸上の系統連系、あるいは浮体同士を接続するため、その安全性や挙動特性に十分注意する必要がある。送電ケーブルは図 3.3.20 に示すように浮体から垂れ下がり、大部分は海底面に敷設あるいは海底の土中に埋設される。ただし、浮体式風力発電では、浮体の水平変位が他の海洋構造物と比較して大きくなることが想定されるため、送電ケーブルに急激な荷重変化が生じないように、中間ブイ等で浮体動揺が伝わりにくくするような工夫が必要となる。

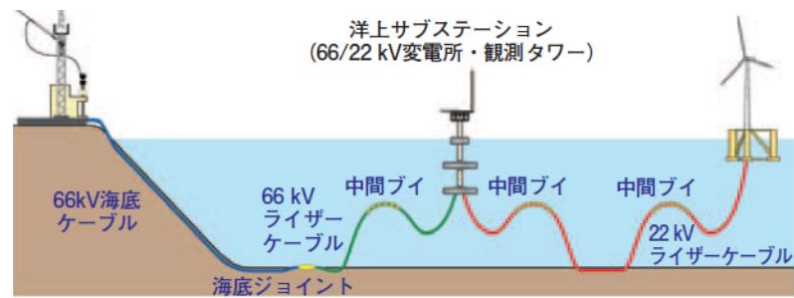


図 3.3.20 送電ケーブルの配置イメージ  
(出典：福島洋上風力コンソーシアム、2013)

### 第3章 洋上風力発電システム

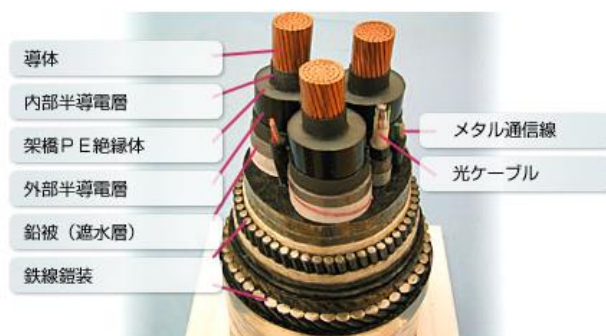


図 3.3.21 送電ケーブルの構造  
(出典：昭和電線ケーブルシステムウェブサイト)

送電する電力や電圧により異なるが、送電ケーブルは図 3.3.21 のような構造となる。

送電ケーブルの挙動において注意すべき個所は、上述の浮体動揺に加え、海底面との摩擦、ケーブル自身の曲げやキンク (kink) 等がある。これらについては浮体の動揺量を解析して求めておくことやケーブル自身の運動についても事前に解析して求めておくことが必要となる (図 3.3.22)。

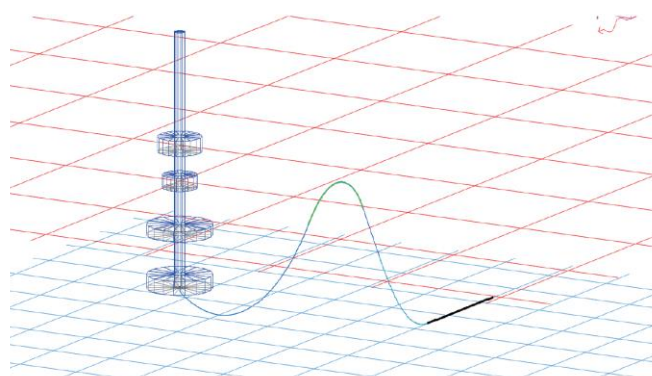


図 3.3.22 送電ケーブルの解析例  
(出典：藤井茂等、2017)

#### 3.3.4 維持管理

浮体式洋上風力発電では、従来の石油掘削リグとは異なり、供用期間内はドック入りが困難であるため、適切な維持管理作業を行い、安全性を保たなければならない。ここでは、風車およびタワーを除く浮体式に特有の維持管理技術について記述する。

##### (1) 浮体構造

水中部や飛沫帯といった箇所は作業員のアクセスが困難であり、浮体内部も空間的余裕が少ないことが多いため、基本的には供用期間中のメンテナンスフリーを想定した設計を行う。そのために必要な塗装厚を確保し、必要であればさらに電気防食等の防食措置も施す。例えば、NK 鋼船規則では表 3.3.7 のように定められている。

### 第3章 洋上風力発電システム

表 3.3.7 防食措置標準

対象構造部材		防食措置	
軽荷喫水 より上部	外殻部材	上甲板、船側外板	耐錆性および耐候性を有する塗料による塗装
軽荷喫水 より下部	外殻部材	船側外板、船底外板	耐海水性を有する塗料による塗装または電気防食あるいはそれらの併用
バラスタタンク内		隔壁、フロア、ガーダ等の桁部材、縦通材等の防撓材	耐海水性を有する塗料による塗装または塗装と電気防食の併用
上記以外の主要構造部材および区画内部材		耐錆塗料による塗装	

(出典：国土交通省海事局、2014 による表を参考に作成)

電気防食はアルミニウム合金や亜鉛等を鋼板に設置し、鉄との電位差を利用して鉄の腐食を防ぐ技術である。電気防食の事例を図 3.3.23 に示す。

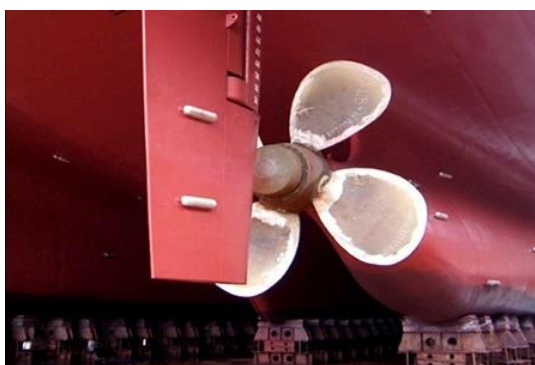


図 3.3.23 船尾に取り付けられた犠牲陽極  
(出典：Cathodic Marine Engineering 社ウェブサイト)

#### (2) 係留系

係留系の損傷は、浮体の漂流といった重大な事故につながるため、適切な維持管理が重要である。主にダイバーや ROV を投入しての目視による損傷検査、損耗量検査や付着生物の除去作業等を行う (図 3.3.24)。

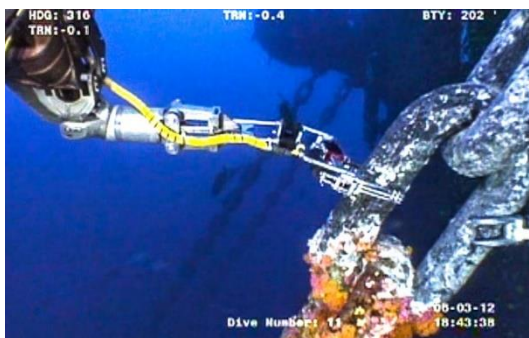


図 3.3.24 ROVによる係留チェーンのメンテナンス作業  
(出典：Gretmar Inc. ウェブサイト)

#### (3) モニタリング項目

陸上風車では、発電量・ロータ回転数・ナセル内温度等を監視するシステム、例えばSCADA等を用いて、常時遠隔監視を行うのが一般的である。浮体式風力発電施設はアクセス性が悪いため、支持構造物についてもその健全性を常時あるいは定期的に監視する必要があると考えられる。監視対象としては、GPSによる水平移動量、ジャイロセンサーによる傾斜角、歪センサーによる重要箇所の変位等が想定される。

同一形式の風車・浮体で構成されるウィンドファームにおいては、特定施設を抽出し、より詳細なモニタリングを行うことも有効であろう。また、ウィンドファーム内の風車間隔は、風速の主方向に $10 \times D$ （ $D$ ：ロータ直径）、直交方向に $3 \times D$ が一般的であるとされている。ウィンドファームが多数の浮体で構成される場合、ウィンドファームの専有面積は広大になり、ウィンドファーム内で気象海象条件が同一でない可能性も考慮すべきであろう。

#### (4) アクセス

浮体式風力発電施設は海岸から数kmあるいは数十kmの距離にあることが多く、アクセス性が非常に重要となる。アクセスは故障時だけでなく、通常の定期メンテナンスにおいても必要なため、適切に考慮することが設備利用率や発電可能率、採算性の向上に直結する。O&Mコストがライフサイクルコスト全体の25%に達するという報告もある。

アクセス船においては、実証実験事業のような供用期間の短い施設では小型の漁船等を転用することもあるが、ウィンドファームにおいては専用船が使用されている。表3.3.8に着床式洋上ウィンドファームで用いられているアクセス船の例を示す。これらのアクセス船には、クレーンを備えた大型船から、人員の輸送を主目的とした小型船まで様々な種類がある。

浮体式洋上風力発電の場合、船の動揺に加え浮体も動揺しているため、乗り移りにはより困難が伴う。福島復興・浮体式洋上ウィンドファーム実証研究事業では図3.3.25に示すアクセス補助装置を搭載した専用船を導入している。

アクセスの成否は現場海域の海象、特に波高に大きく依存するため、より大波高でも運用可能なアクセス船の開発が望まれている。

### 第3章 洋上風力発電システム

表 3.3.8 ウィンドファームアクセス船の例

外観	要目
	<p>船名：Aaryan                      全長（LOA）：18m                      定員：12人</p>
	<p>船名：Aberdaron Bay                      全長（LOA）：19.1m                      定員：12人                      載貨重量：3t</p>
	<p>船名：Acergy Viking                      全長（LOA）：97.6m                      載貨重量：100 t</p>

(出典：4C offshore ウェブサイトの図を参考に作成)



図 3.3.25 福島復興・浮体式洋上ウィンドファーム実証研究事業の通船  
 (出典：東京汽船ウェブサイト)

また、着床式のウィンドファームでは、緊急時の人員の輸送等において図 3.3.26 のようにヘリコプターを使用することもある。



図 3.3.26 ヘリコプターによる人員輸送の様子  
 (出典：offshore WIND biz 社ウェブサイト)

### 第3章 洋上風力発電システム

#### <参考資料>

- 牛山泉. 風力エネルギーの基礎. オーム社, 2005, 263p.
- 牛山泉. 風車工学入門. 第2版. 森北出版, 2013, 208p.
- 日立製作所, “ダウンウィンドロータ”, 日立製作所  
<http://www.hitachi.co.jp/products/power/wind-turbine/feature/rotor/>, (参照 2021-02-01).
- 海洋エネルギー資源利用推進機構. OEA-J NEWS LETTER 2016年4月号. 海洋エネルギー資源利用推進機構. 5p.
- AirfoilTools. “AirfoilTools”. AirfoilTools. <http://airfoiltools.com/index>, (cited 2021-02-01).
- 池田大夢, 飯田誠, 荒川忠一. 風車回転翼後流のCFD解析. 第35回風力エネルギー利用シンポジウム. 2013, p.228-231.
- 経済産業省・国土交通省. 第1回 洋上風力の産業競争力強化に向けた官民協議会作業部会資料. 2020
- Jonkman, J.M. Technical Report NREL/TP-500-41958 Dynamics Modeling and Loads Analysis of an Offshore Floating Wind Turbine. National Renewable Energy Laboratory, 2007, 208p.
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構. NEDO 再生可能エネルギー技術白書. 第2版. 森北出版, 2013, 672p.
- The European Wind Energy Association. “Wind in our Sails. The coming of Europe’s offshore wind energy industry.” The European Wind Energy Association. 2011.
- Rathmann, O. et al. : Wake modeling for intermediate and large wind farms, EWEC 2007 Wind Energy Conference and Exhibition
- 海津信廣. 洋上風力発電の現状と今後の展望. 日本風力発電協会誌特集. 2015年8月.  
[http://jwpa.jp/2015\\_pdf/88-33tokushu.pdf](http://jwpa.jp/2015_pdf/88-33tokushu.pdf), (参照 2021-02-01).
- (株) ウィンド・パワー. “ウィンド・パワーかみす 第2洋上風力発電所 “. ウィンド・パワー. <http://www.komatsuzaki.co.jp>, (参照 2021-02-01).
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構. 平成26年度 NEDO 新エネルギー成果報告会. 2014.
- 鈴木英之. 浮体式洋上風力発電の開発動向. 日本風力発電協会誌特集. 2012年8月., (参照 2021-02-01).
- Blue H Engineering. “Technology”Blue H Engineering. Blue H Engineering.  
<http://www.blueengineering.com/technology.html>, (cited 2021-02-01).
- Equinor. “HyWind”. Equinor. <https://www.equinor.com/en/what-we-do/floating-wind.html>, (cited 2021-02-01).
- Principle Power. “Principle Power”. Principle Power.  
<http://www.principlepowerinc.com/en/home>, (cited 2021-02-01).
- 福島洋上風力コンソーシアム. “プロジェクト概要”. 福島復興・浮体式洋上ウィンドファーム実証研究事業. <http://www.fukushima-forward.jp/project01/gaiyou/index.html>, (参照 2021-02-01).

### 第3章 洋上風力発電システム

- 松下崇俊、他. 風力発電システムの IEC/JIS 規格策定動向. 日本風力エネルギー学会誌. Vol.41. No.1. 2017
- 土木学会. 風力発電設備支持物構造設計指針・同解説 [2010年版]. 土木学会, 2010, 582p.
- 国土交通省海事局安全基準課. 国海安第 194 号. 浮体式洋上風力発電施設技術基準. 国土交通省, 2020
- 国土交通省海事局. 浮体式洋上風力発電施設技術基準安全ガイドライン. 2020
- 日本海事協会. 浮体式洋上風力発電設備に関するガイドライン. 日本海事協会, 2012, 52p.
- 日本電機工業会. “風力発電システム”. 日本電機工業会. <https://www.jema-net.or.jp/Japanese/res/wind/ninsyo.html>, (参照 2021-02-01).
- 今村博. 「IEC 61400-3 Ed.1 (2009):洋上風車の設計要件」について. 風力エネルギー. 2009, Vol.33, No.2, p.55-59.
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構. 着床式洋上風力発電導入ガイドブック (第一版). 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 2015, 380p.
- 石原孟. 着床式洋上風力発電技術の現状と課題. Journal of JWEA. 2010, Vol.34, No.2, p.78-84.
- A2SEA News. “Size matters”. A2SEA. <http://a2seanews.editionmanager.com/2013/11/11/size-matters/>, (cited 2021-02-01).
- 4Coffshore. “Jacket or Lattice Structures”. 4Coffshore. <http://www.4coffshore.com/windfarms/jacket-or-lattice-structures-aid5.html>, (cited 2021-02-01).
- Twidell, T. et al., 日本風力エネルギー学会誌. 洋上風力発電. 鹿島出版会, 2011, 375p.
- National Renewable Energy Laboratory. Dynamics Modeling and Loads Analysis of an Offshore Floating Wind Turbine. National Renewable Energy Laboratory, 2007, 45p.
- National Renewable Energy Laboratory. “FAST” National Renewable Energy Laboratory ウェブサイト. <https://nwtc.nrel.gov/FAST>, (cited 2021-02-01).
- Ballast Nedam. Accelerating Foundation Installation, The real focus point for offshore wind logistics. EWEA Offshore 2011.
- POWER & ENERGY SOLUTIONS. “Vibro driving: the next chapter in offshore wind”. <https://cdn.pes.eu.com/v/20180916/wp-content/uploads/2020/05/PES-W-1-20-CAPE-Holland-Talking-Point-SH-Lead-V5-1.pdf>, (cited 2021-02-01).
- BOW Terminal 社ウェブサイト. <https://www.bowterminal.nl/references/22-lincs>
- Offshorewind ウェブサイト. <https://cdn.offshorewind.biz/wp-content/uploads/sites/2/2012/04/03161227/Denmark-Jumbo-Fits-First-Transition-Pieces-at-Anholt-Offshore-Wind-Farm-2.jpg>
- Wind Energy the Fact ウェブサイト. <https://www.wind-energy-the-facts.org/offshore-support-structures.html>, (cited 2021-02-01).
- JFE エンジニアリング. ジャケット式岸壁について. 東北地方整備局 第 2 回技術発表会.

### 第3章 洋上風力発電システム

2009, 13p.

- Robertson, J. Mass manufacturing creating a sustainable industry、Perfect know-HOW! Hamburg Offshore Wind conference、23-24 Sept、Germanischer Lloyd、2008
- Gerrad Hassan. Offshore wind farm construction, installation methods and plant. Beijing. 2010.
- 日本産業機械工業会. “欧州における洋上風力発電の現状（その2）情報報告”. ウィーン. 日本産業機械工業会, p.35-61,
- 作業船協会. “作業船の種類”. 作業船協会.  
<http://www.s-jwa.or.jp/workvessels/index.html>, (参照 2021-02-01).
- 日本財団ウェブサイトを. [https://project-kaiyoukaihatsu.jp/industry/flow\\_02.shtml](https://project-kaiyoukaihatsu.jp/industry/flow_02.shtml)
- , (cited 2021-02-01).
- 井上俊司. 浮体式洋上風力発電の技術思想、技術開発、技術戦略. SEA JAPAN2012 海技研セミナー, 2012
- Tavner, P. How monitoring improves reliability & availability of offshore wind turbines & lowers cost of energy. 次世代風力発電システムの創成寄付講座. 第2回シンポジウム 洋上風力発電ワークショップ4, 2014.
- Energiesdelamer ウェブサイトを. . “NENUPHAR OFFSHORE WIND IN COMPULSORY LIQUIDATION”.  
<https://www.energiesdelamer.eu/2018/04/23/twinfloat-nenuphar-liquidation-judiciaire/>, (cited 2021-02-01).
- 福島洋上風力コンソーシアム. 福島洋上風力実証事業メールマガジン. vol.17, 2016
- Ideol. “Offshore Wind”. Ideol. <https://www.ideol-offshore.com/en/technology/>, (cited 2021-02-01).
- Floatgen. “FLOATGEN wind power going further offshore”. Floatgen.  
<http://www.floatgen.eu>, (cited 2021-02-01).
- NAUTICEXPO 社ウェブサイト  
<https://www.nauticexpo.com/prod/vryhof/product-68605-504985.html>  
<https://www.nauticexpo.com/ja/prod/vryhof/product-68605-504988.html>, (cited 2021-02-01).
- SEMAR 社ウェブサイト.  
<https://www.semar.no/oil-and-gas/>, (cited 2021-02-01).
- SINTEF. “Dropping anchor in deep water”, SINTEF.  
<https://www.sintef.no/en/latest-news/dropping-anchor-in-deep-waters/>, (cited 2021-02-01).
- 飯島一博, 井上俊司, 岡田真三, 尾崎雅彦, 神田雅光, 鈴木英之, 高木健, 前田克弥, 正信聡太郎, 松浦正巳. 船舶海洋工学シリーズ②海洋構造物. 成山堂書店, 2013, 176p.
- Ahlgrim, Jim. IEA Wind Annual Report, IEA WIND. 2014, 197p.
- 中村昭裕, 林義之, 松下崇俊, 刈込界, 本田明弘, 太田真. 浮体式洋上風車の荷重設計及び



### 第3章 洋上風力発電システム

動揺安定性の評価技術. 三菱重工技法新製品・新技術特集. 2015, Vol.52, No.1, p30-36.

- Jonkman, J.M. Conference Paper NREL/CP-500-42589 Influence of Control on the Pitch Damping of a Floating Wind Turbine. National Renewable Energy Laborator, 2008, 15p.
- 福島洋上風力コンソーシアム. “2MW 級洋上風力発電船曳航作業実施のお知らせ（曳航作業完了）【小名浜港 出入港】”. 福島洋上風力コンソーシアム. 2013.  
[http://www.fukushima-forward.jp/project01/safety/pdf/131005\\_2.pdf](http://www.fukushima-forward.jp/project01/safety/pdf/131005_2.pdf)
- 福島洋上風力コンソーシアム. “2MW 級洋上風力発電船及び海底ケーブルの沖合作業のお知らせ（浮体係留作業完了）【福島県沖合】”. 福島洋上風力コンソーシアム. 2013.  
[http://www.fukushima-forward.jp/project01/safety/pdf/131005\\_3.pdf](http://www.fukushima-forward.jp/project01/safety/pdf/131005_3.pdf), (参照 2021-02-01).
- 昭和電線ケーブルシステム. “海底 CV ケーブル”. 昭和電線ケーブルシステム.  
[https://www.swcc.co.jp/cs/products/detail/cv\\_cable\\_1796.html](https://www.swcc.co.jp/cs/products/detail/cv_cable_1796.html), (参照 2021-02-01).
- 藤井茂, 館野祐二, 富久田晃司, 富永康博, 堀口規昭, 中野博史, 今博之, 籠浦徹, 山口卓見, 榊原広幸. Fukushima FORWARD Project における送電システムの開発. 古河電工時報. 2017, 第 131 号, p.44-48.
- Cathodic Marine Engineering. “Sacrificial Anodes System”. Cathodic Marine Engineering ウェブサイト. <https://cathodicme.com/cathodic-protection/sacrificial-anodes-system/>, (cited 2021-02-01).
- Gretmar Inc. ウェブサイト.  
<https://www.gretmar.net/services/subsea/>, (cited 2021-02-01).
- 4Coffshore. “Wind Farm Service Vessels”. 4Coffshore.
- 東京汽船. “洋上風力発電アクセス専用船 JCAT ONE の供用”. 東京汽船.  
<http://www.tokyokisen.co.jp/service/ctv.html>, (参照 2021-02-01).
- offshoreWIND.biz. “UK’s New Offshore Wind Farms Will See More O&M from the Sky”. offshoreWIND.biz. <http://www.offshorewind.biz/2016/03/14/uks-new-offshore-wind-farms-will-see-more-om-from-the-sky/>, (cited 2021-02-01).
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構. 日本型風力発電ガイドライン、台風・乱流対策編. (独) 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 2008, 110p.
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構. 日本型風力発電ガイドライン、落雷対策編. 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 2008, 69p.
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構. 風力発電導入ガイドブック第 9 版. 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 2008, 201p.
- 戸田建設. 浮体式洋上風力発電実証事業委託業務成果報告書. 戸田建設, 2011～2016.
- 日本海事協会. 鋼船規則・同検査要領 P 編 PS 編. 日本海事協会, 2014.
- 日本海事協会. 風車及びウィンドファームの認証に関するガイドライン. 日本海事協会, 2014, 36p.
- 日本船舶技術研究協会. 我が国における洋上風車設置船・作業船の在り方について 基礎検

### 第3章 洋上風力発電システム

討調査報告書. 日本船舶技術研究協会, 2013, 58p.

- 赤星貞夫. 洋上風車の安全確保に向けた国際規格策定作業と我が国の対応. 第8回構造物の安全性・信頼性に関する国内シンポジウム, 2015.
- 牛山泉. 大型風力発電機開発の技術史的考察. 太陽エネルギー. 2008, VOL34, NO.6, p.3-9.
- 元綱数道, 熊倉靖, 高橋義明. 海洋工学の基礎知識. 成山堂書店, 1999, 292p.
- IRENA. IRENA Working Paper Renewable Energy Technologies : Cost Analysis Series Wind Power. IRENA, 2012, 56p.