



# 海 洋 開 発 工 学 概 論

海洋開発技術編

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科／研究科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科／研究科の方は、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
2	海洋開発の技術体系	2
2.1	海洋資源開発の技術的俯瞰	2
2.1.1	開発スキーム	2
2.1.2	技術マップ	10
2.2	海洋再生可能エネルギー開発の技術的俯瞰	21
2.2.1	開発スキーム	21
2.2.2	技術マップ	23
2.3	まとめ	31
3	自然環境条件	32
3.1	はじめに	32
3.2	自然環境要素	32
3.2.1	波	32
3.2.2	風	49
3.2.3	潮流・海流	56
3.2.4	その他	62
3.3	評価手法	69
3.3.1	データベース	69
3.3.2	極値統計解析	71
3.4	まとめ	74
4	海洋構造物に作用する荷重と応答	80
4.1	はじめに	80
4.2	座標系と6自由度	80
4.3	浮体構造物の動揺解析	81
4.3.1	周波数領域解析	82
4.3.2	揺れにくい浮体	94
4.3.3	時間領域解析	96
4.3.4	安全性・稼働性の評価	99
4.4	構造応答解析	102
4.4.1	要素部材の静解析	103
4.4.2	海洋構造物の動的構造解析	107
4.4.3	有限要素法による解析	111
4.4.4	安全性評価	114
4.5	まとめ	114
5	位置保持技術	116

5.1	はじめに .....	116
5.2	係留技術 .....	116
5.2.1	概要 .....	116
5.2.2	様々な係留方法 .....	116
5.2.3	アンカー .....	118
5.2.4	設置 (インストレーション) .....	120
5.3	DPS .....	120
5.3.1	概要 .....	120
5.3.2	制御システムとその基礎 .....	120
5.3.3	推進器システム .....	122
5.3.4	発電システムとパワーマネジメント .....	124
5.3.5	センサー技術 .....	124
5.3.6	システムの信頼性とその対策 .....	125
5.3.7	DPS クラス .....	126
5.4	まとめ .....	127
6	サブシーシステム .....	129
6.1	はじめに .....	129
6.2	サブシー機器 .....	129
6.2.1	概要 .....	129
6.2.2	アンビリカルケーブル .....	130
6.2.3	ライザーシステム .....	133
6.2.4	フローライン・パイプライン .....	139
6.3	フローアシュアランス (flow assurance) .....	140
6.3.1	概要 .....	140
6.3.2	管内流れ .....	141
6.3.3	伝熱 .....	146
6.3.4	ハイドレート .....	149
6.3.5	ワックスとアスファルテン .....	152
6.3.6	腐食とスケール .....	154
6.3.7	浸食と砂 .....	156
6.4	ROV・AUV .....	157
6.4.1	概要 .....	157
6.4.2	ROV .....	157
6.4.3	AUV .....	160
6.5	まとめ .....	162
7	海洋構造物の設計 .....	165
7.1	はじめに .....	165
7.2	設計フロー .....	165

7.2.1	概念設計 .....	166
7.2.2	予備設計 .....	166
7.2.3	基本設計 .....	166
7.3	基準 .....	167
7.3.1	IMO .....	167
7.3.2	ISO, API .....	167
7.3.3	IEC .....	169
7.3.4	その他 .....	169
7.4	認証ステップ .....	170
7.4.1	第三者認証機関 .....	170
7.4.2	認証プロセス .....	170
7.5	リスク評価 .....	172
7.5.1	リスク評価の流れ .....	173
7.5.2	HAZID .....	174
7.5.3	リスク評価 .....	175
7.5.4	リスク解析 .....	176
7.6	まとめ .....	178
	(付録) 海洋開発 参考動画集 .....	180
	索引 .....	181

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。



## 第1章 序論

### 1 序論

海洋開発が対象としている領域は広く、石油・天然ガス、メタンハイドレート等のエネルギー資源開発、海底熱水鉱床、コバルトリッチクラスト、マンガン団塊、レアアース泥等の海底鉱物資源開発（以下、エネルギー資源開発と海底鉱物資源開発を合わせて、海洋資源開発と記載する）や、洋上風力、波力、潮流・海流、海洋温度差発電等の海洋再生可能エネルギー開発の他、水産資源の増養殖等の水産資源開発、海洋空間利用や海底パイプラインの敷設等の海洋土木などが挙げられる。

本書「海洋開発工学概論 海洋開発技術編」では、海洋資源開発及び海洋再生可能エネルギー開発に共通して必要となる技術に焦点を当て、海洋開発工学を学ぼうとする理工系の大学生・大学院生の初学者等に、当該技術に関する基礎的な知識を与えることを目的とする。海洋資源開発、海洋再生可能エネルギー開発について、それぞれの開発工程、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の技術的概要については「海洋開発工学概論 海洋資源開発編」、「海洋開発工学概論 海洋再生可能エネルギー開発編」を参照いただきたい。

本書では、まず第2章で、海洋資源開発及び海洋再生可能エネルギー開発に必要な技術（特に海洋開発固有の技術）が、どの開発工程で活用されているのかを整理した技術マップを示した上で、第3章以降で、海洋資源開発及び海洋再生可能エネルギー開発に共通の基礎となる項目について紹介する。具体的には、設計の前提となる自然環境条件、海洋構造物に作用する荷重と応答、位置保持技術、サブシーシステムについて概説し、さらに海洋構造物の設計の進め方や設計に係る基準等について概説する。

### 2 海洋開発の技術体系

本章では、海洋開発においてどのような技術が用いられているか、について整理する。

海洋開発には石油、天然ガスといった「エネルギー資源」や海底熱水鉱床やレアアース泥といった「海底鉱物資源」を開発するものと、風力や波力といった「再生可能エネルギー」の開発、さらには新漁場整備や養殖などの「水産資源」の開発も含まれるが、ここでは「海洋資源開発」（エネルギー資源開発と海底鉱物資源開発）および「再生可能エネルギー開発」に着目し、「水産資源」については取り扱わないこととする。

以下、2.1節では海洋資源開発、2.2節では再生可能エネルギー開発についての開発工程を概説するとともに必要な技術を整理した技術マップを示す。

#### 2.1 海洋資源開発の技術的俯瞰

海洋資源開発はその名の通り「海洋」に存在する資源開発を行うことを目的としている。その資源は「石油」「天然ガス」が主流であり、世界各国で商業生産が行われている。また、「マンガング塊」や「コバルトリッチクラスト」は商業ベースになっていないが、開発手法の検討が過去に行われていた。近年では「メタンハイドレート」「熱水鉱床」の開発手法の検討が今後の商業化を目指して行われている。

上記の資源は海底下もしくは海底面に存在しているが、一方で海水中に溶存している資源もある。例えばリチウムやマグネシウムは化合物として溶存しており、これらの採集方法はほぼ確立されている。詳細については以下の文献などを参照願いたい。

- ・ 滝山ら. “海水溶存資源の総合的利用技術
- ・ (一財) エンジニアリング協会. 海水中レアメタル等補修可能性調査報告書
- ・ 大井健太. 海水、かん水からのリチウムの吸着回収技術

以下は、石油・天然ガス開発を主とした開発の流れの概略をまとめている。

##### 2.1.1 開発スキーム



図 2.1.1 石油・天然ガス開発の流れ

大きな開発の流れ（スキーム）は図 2.1.1 のようになる。

まず、開発を行うには、その海域における開発権を得る必要がある（入札期）。入札に際して、ある程度の地質学的（海底下の地層）情報が与えられ、その情報を元に、入札が行われる。入札における落札者は、より正確に海洋資源がどこにどれだけあるか、を把握する（探鉱期）ことから海洋開発を始める。その後、どのような開発・生産方法が良いかの検討（FS（Feasibility Study）期）を行い、検討した生産システム（production system）の開発および製作・建造し、海域に設置しテスト生産を行う（開発期）。すべての設置作業などが完了した後に、本格的に資源の生産が開始される（生産期）。生産期では生産システムのメンテ

## 第2章 海洋開発の技術体系

ナンス作業が中心となる。生産期間終了後は海域に設置した機器類を撤去（終結期）することとなる。

以降、時期毎にどのような施設・機器類が用いられるか等の概要及びイメージ図を示す。

### (1) 探鉱期

探鉱期では開発する資源の位置と量を可能な限り正確に把握することが必要である。

熱水鉱床やマンガン団塊、コバルトリッチクラストといった海底面に存在する鉱物資源の探査においては遠隔操作無人潜水機（ROV: Remotely Operated Vehicle）や自律型無人潜水機（AUV: Autonomous Underwater Vehicle）による探査が一般的である（図 2.1.2）。

一方、石油・天然ガスに代表される海底下に存在する資源の場合は、図 2.1.3 に示す、物理探査船を用いた音波による物理探査が最初に行われる。物理探査には、地震探査、重力探査、磁気探査、電磁探査等があり、探査範囲の広い初期段階には、重力探査、磁気探査、電磁探査が主に用いられるが、探査範囲を選別後は精度の高い地震探査が用いられる。地震探査は、エアガン（air gun）によって音波を発生させ、海底面および海底面下の地層からの反射波を、受信装置（ハイドロフォン）が 10~30m 間隔で備えられているストリーマーケーブルによって計測し、受信結果を解析することにより、海底面下の地層の様子を把握する。なお、ストリーマーケーブル 1 本あたりの長さは数キロメートルもあり、これを概ね 100m 間隔で複数本（多い場合は 20 本程度）、物理探査船で曳航しながら探査を行う。この受信結果の解析（複数箇所のハイドロフォンでの計測結果から海底下の地層を推定）と解析結果の解釈（地層における石油・ガスの存在の可能性）が非常に重要である。

物理探査の結果、石油・天然ガスが存在すると推測される地層に対して、実際の油ガス層の状態を把握するために「試掘」を行う。試掘の概念図を図 2.1.4 に示す。試掘は洋上の掘削リグから行う。一般的な掘削は「ドリルビット」を回転させながら掘り進む。回転の動力源は掘削リグ上にあるため、ドリルビットへの回転の伝達はドリルパイプによって行われる。また、ドリルパイプの外側にライザー（riser）管があり、このライザー管は掘削リグと海底とを繋いでいる。

掘削中に地層（コア）を採取したい場合にはコアリングシステムを用いてコアを回収する。コアリングシステムについては「海洋底掘削の基礎と応用（成山堂書店）」に詳しい記載がある。

ドリルビットにより掘削した坑井（井戸）は、掘ったままでは地層からの圧力によって崩れるために、「ケーシングパイプ」と呼ばれる鋼製管で周囲の補強を行う。海底面から順にケーシングパイプを設置することになるが、当然、設置してあるケーシングパイプの内径よりも大きな外径のケーシングパイプは通らないため、掘削深度が深くなるにつれて坑径とケーシングパイプは細くなっていく。また、ケーシングパイプが細くなりすぎるとドリルビットが通らなくなってしまう。このように掘削深度とケーシングパイプとは密接な関係があるため、この点を考慮して掘削計画を立てる必要がある。なお、ケーシングパイプとドリルビットで掘削した坑井の間には隙間が生じるため、この隙間はセメントで固めている。

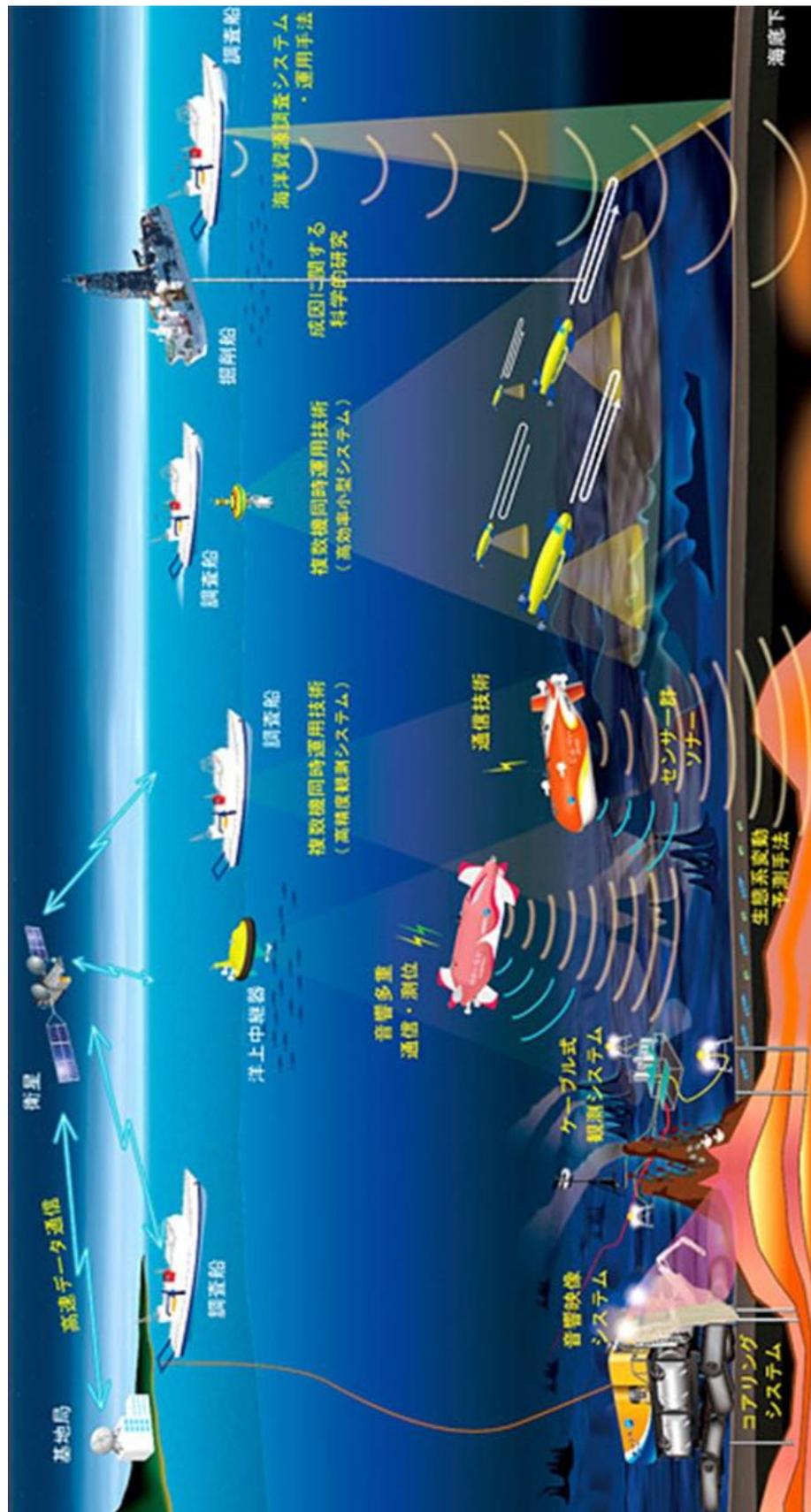


図 2.1.2 海底鉱物資源探査方法

(出典：日本財団オーシャンイノベーションコンソーシアム)

## 第2章 海洋開発の技術体系

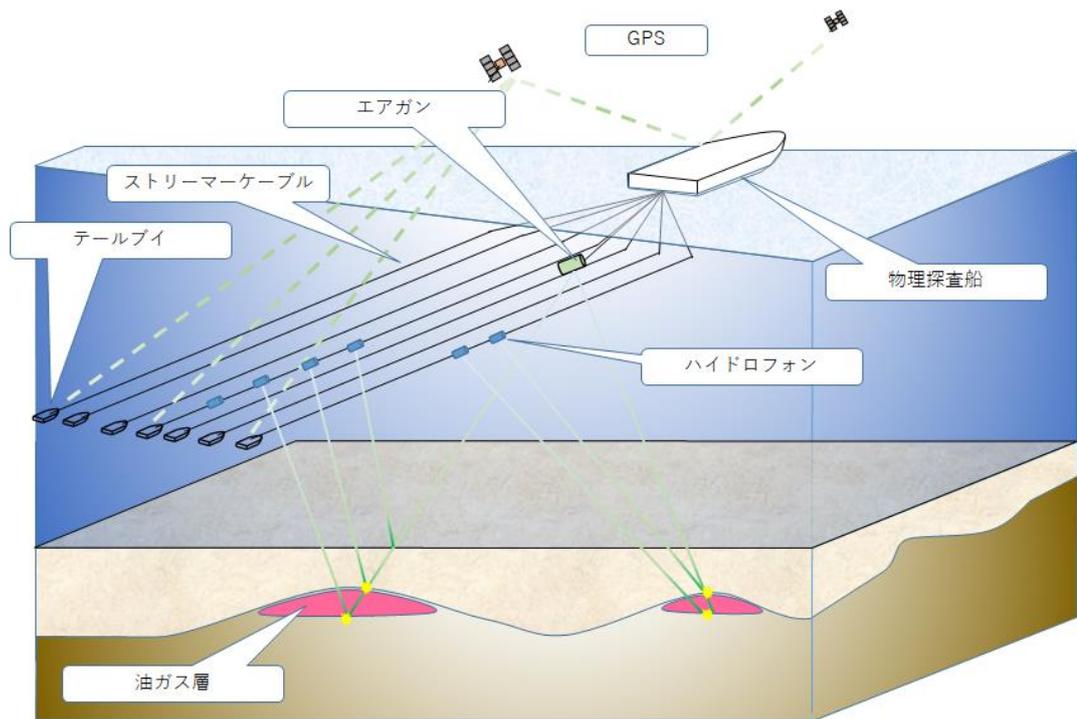


図 2.1.3 物理探査船による探査イメージ図

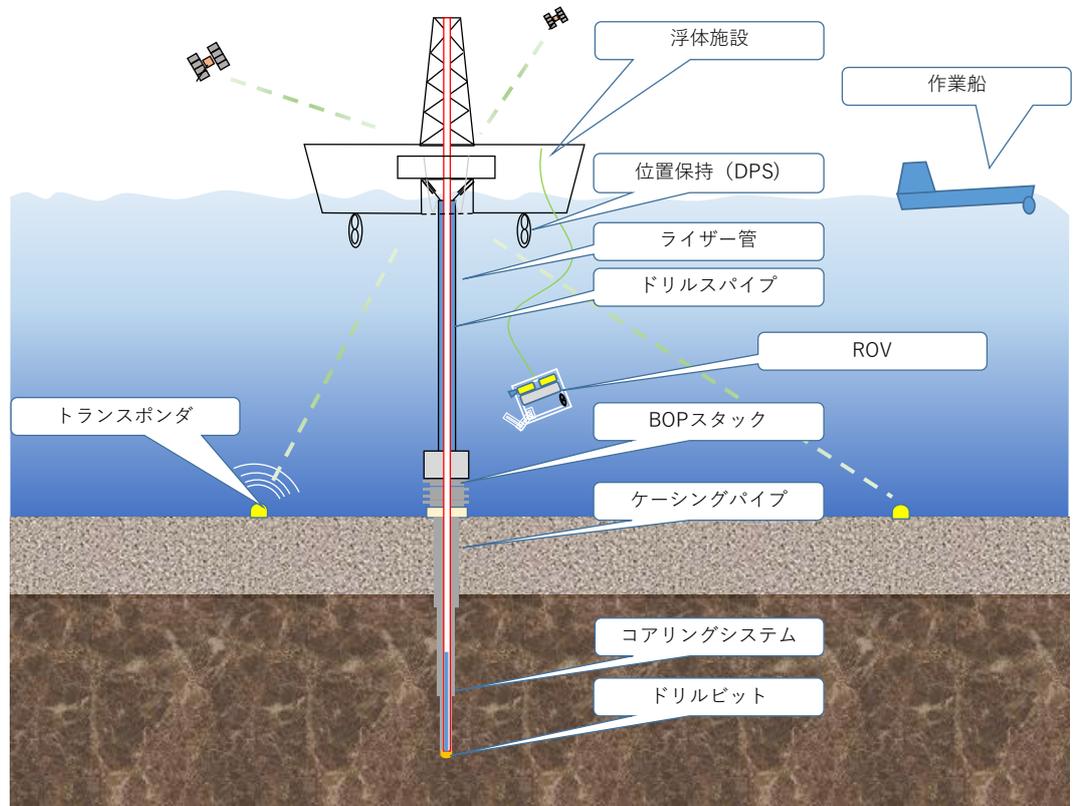


図 2.1.4 試掘のイメージ図

## 第2章 海洋開発の技術体系

一方、掘削した井戸内の圧力を地層からの圧力とほぼ同じにすれば、井戸が崩れることはない。ある程度の深度まで、この圧力をほぼ同じにするために用いられるものが「泥水」と呼ばれる比重を調整した特殊な液体である。この泥水はドリルパイプの中を通して浮体上から供給され、ドリルパイプとライザー管との間（アニュラス）を<sup>でいすい</sup>通って浮体上まで戻る。

なお、泥水には掘削した掘屑（cuttings、カッティングス）を坑井外や掘削浮体上に運ぶ役割もある。この掘屑により地層状況を把握することや、掘屑の量によってどの程度掘削できているか等も把握することができる。より正確に地層状態を把握するためには、コアリングシステムによるコア採取が有効であるが、この掘屑によってもある程度の情報を得ることが可能である。

掘削中に異常な高圧層に到達した場合、状況によってはガスや水、油などが掘削中の坑内に侵入し、ライザー管を通して浮体上に噴出する等の事故が発生する可能性がある。そのため、噴出防止装置（BOP : Blowout Preventer）を海底面に設置し、異常があった際には泥水の流路を閉鎖し、浮体上へ噴出しないようにする。この BOP にはこの流路を塞ぐ装置（アニュラー型 BOP、図 2.1.5 参照）とドリルパイプを切断し、坑井と完全に切り離す装置（ラム型 BOP、図 2.1.6 参照）の 2 種類が組み合わさっている。

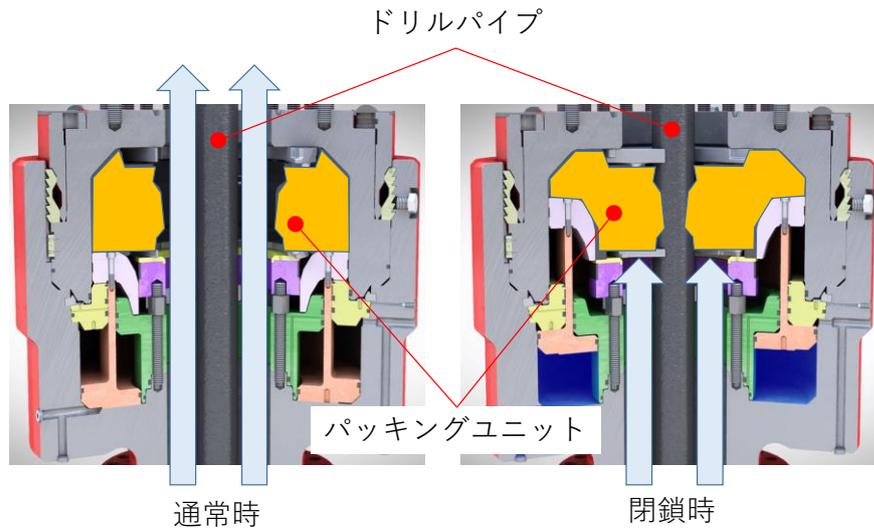


図 2.1.5 アニュラー型 BOP による流路閉鎖

(出典 : Schlumberger 社ウェブサイトより著者加工)

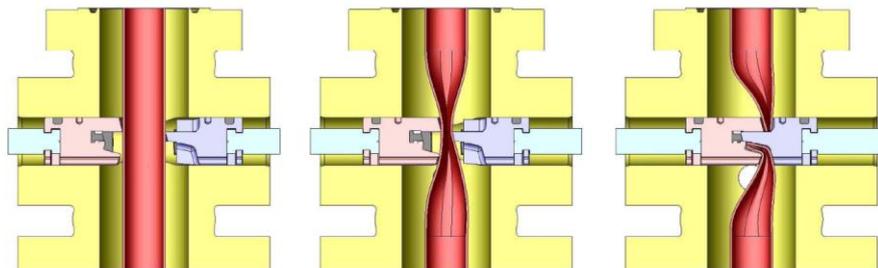


図 2.1.6 ラム型 BOP によるパイプ切断模式図

掘削リグは上述の通り、海底とライザー管やドリルパイプによって繋がれている。ライザー管およびドリルパイプは鋼製であるため、坑井直上から浮体が移動すると破損する恐れがある。そのため、掘削船やセミサブマージブル (semi-submersible : 半潜水型) リグなどの浮体式掘削リグの場合、浮体を坑井直上に位置保持する必要がある。この位置保持は自動船位保持装置 (DPS : Dynamic Positioning System) によって行われることが、浮体式掘削リグの場合では一般的である。DPS による位置保持では正確に浮体の位置を知る必要があるため、トランスポンダや GPS (Global Positioning System) により、時々刻々浮体の位置を把握し、位置保持を行う。位置保持については、5章に記載している。

なお、掘削方法については「海洋開発工学概論 海洋資源開発編」に詳しく記載されている。

## (2) FS 期

試掘後は、試掘結果と物理探査結果などを照らし合わせながら、どのような生産システムを採用するか、また、どの位置にどのような坑井を掘削するか、などの FS を実施する。FS は技術面のみならず、経済 (経営) 面、端的に言えば「儲かるか、儲からないか」の最終判断を行うこととなる。

生産システムのイメージ図を図 2.1.7 に示す。

生産システムは浮体式海洋石油・ガス生産貯蔵積出設備 (FPSO : Floating Production, Storage and Offloading unit) に代表される生産用浮体、サブシー生産システム (SPS : Subsea Production System) と呼ばれる海底機器類、生産用浮体と海底機器とを繋ぐライザーシステム (riser system) の 3 つに大別できる。6 章にて後述するサブシーシステム (subsea system) は SPS とライザーシステムを合わせて記載している。

生産用浮体は浮体上に上がってきた石油・天然ガスを精製するためのプラントが搭載された浮体である。精製後の石油・天然ガスを貯蔵し、オフローディングホースを介してシャトルタンカー (陸上に移送するためのタンカー) に出荷する。なお、生産用浮体は浮体式掘削リグと異なり、DPS による位置保持ではなく、係留システム (係留索とアンカー) による位置保持が一般的である。なお、シャトルタンカーには通常のタンカーと DPS 付きタンカーの 2 種類がある。

## 第2章 海洋開発の技術体系

SPS と生産用浮体とはライザーシステムで繋がれており、このライザーシステムによって、海底から洋上まで石油・天然ガスを移送する。6章にて後述するように、ライザーシステムには様々な形態が開発・提案されており、水深や環境条件、浮体条件によってシステム構成を選択する必要がある。

海底面に設置される SPS は坑井口に設置される坑口装置（バルブの集合体。クリスマスツリーとも呼ばれる）やポンプ、セパレータ、マニフォールド、フローライン（flowline）などで構成されている。これら装置への電力・油圧はアンビリカル（umbilical）ケーブルと呼ばれるケーブルで浮体から供給される。

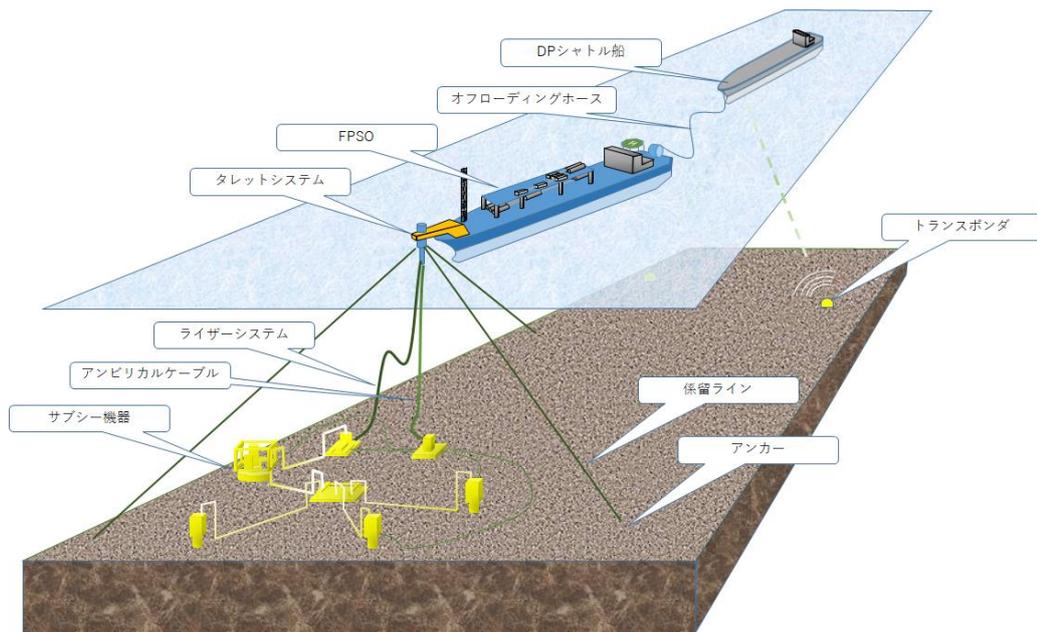


図 2.1.7 生産システムのイメージ図

### (3) 開発期

FS 期において決定した開発システムを建造・製造したのち、作業船を用いて設置を行う。生産用浮体は造船所から設置海域まで移動させる必要があり、タグボートによる曳航（wet towing：浮体を浮かべたまま曳航する方法）と大型運搬船に浮体を搭載し、所定海域まで移動させる dry towing（wet towing に対して、浮体が濡れないためにこのような言い方がなされる）がある。

生産用浮体を目的の海域まで移動させた後は、係留システムによって、浮体を係留する必要がある。むろん、浮体が到着する前に係留システムを設置しておき、浮体到着後に係留索を生産用浮体に繋ぐ。

その後、海底に設置された SPS と石油・ガスの流路となる「ライザー管」の他、SPS を制御するための「アンビリカルケーブル」等を生産用浮体と接続する。

これらの設置作業は、荒れた海象中ではできない。例えば日本周辺をイメージした場合、台風シーズンや冬期は海象が厳しくなることが想定されるため、作業スケジュールから外

## 第2章 海洋開発の技術体系

し、穏やかな時期を狙って設置作業のスケジュールを組む。このタイミングで設置作業を行うには、製造・建造がいつまでに終わっている必要があるか、と逆算しながら全ての工程を組む必要がある。この工程管理を誤ると、生産開始が遅れ、1年以上遅れる可能性も十分にある。

### (4) 生産期

開発期において設置された各施設を用いて、石油・天然ガスの生産を行う。生産期間は開発シナリオによるが、15～30年程度である。

その間、生産用浮体がメンテナンスの為にドックに入ることはなく、生産期間中は洋上にて稼働し続ける。また、SPSについても同様に海底から引き上げてメンテナンスを実施することはない。

従って、生産期間中においては、操業中のメンテナンス作業が主たる業務となり、非常に重要である。例えば、フローライン等の機器と機器を繋ぐパイプでは図 2.1.8 に示すようなハイドレート、ワックス (wax) といった物質によって管路が狭くなり、所定の流量が確保できなくなることがある。これらの阻害要因を排除し、必要な流量を流すことができるように管路を確保する設計の必要がある (フローアシュアランス : flow assurance)。フローアシュアランスの詳細については 6.3 章に記載している。



図 2.1.8 閉塞例

(上段左からハイドレート、ワックス、アスファルテン、下段左からエマルジョン、スケール)

(出典 : SIMTEC PROCESS SOLUTIONS 社ウェブサイト)

フローラインのメンテナンスはラバータイプのピグ (pig) を用いて阻害要因の撤去作業やインテリジェントピグを用いた腐食進行度および残肉厚の測定を行う。また、海底面に設置してある機器類は陸上に引き上げることが容易ではないため、海底においてメンテナンス作業を行う必要があるが、ダイバーによる作業可能水深 (300m) を大きく超えてい

## 第2章 海洋開発の技術体系

ることが多いため、ROVやAUVといった海中ロボットによる作業となる。

### (5) 終結期

生産が終了したサブシーシステムは撤去し、坑井は廃坑とする必要がある。サブシーシステムは作業船および海中ロボットを駆使して撤去することとなる。また、坑井は坑内を数段のセメントでプラグし、坑口装置を海底面より取り外す。

### 2.1.2 技術マップ

上述の開発スキームに沿って、各スキームで必要となる構成機器類・技術を抽出し、各構成機器類・技術を「自然環境」「荷重と応答」「位置保持」「メンテナンス」「通信・制御」「設計」「施工」「特殊技術」「その他」のキーワード（大学などでの授業科目を想定し、海洋開発特有の項目を分類したもの）へ対応させたものを表 2.1.2～表 2.1.4 にまとめている。

なお、表中の数字は本書で記載している章を示しており、○印は本書に記載していないが、対応している項目であることを示している。

## 第2章 海洋開発の技術体系

表 2.1.1 海洋資源開発技術マップ（入札期）

内容	主な構成機器等	自然環境	荷重と応答	位置保持	メンテナンス	通信・制御	設計	施工	特殊技術	その他
(1) 入札期										
物理探査										
	リモートセンシング									
	物理探査船	3	4							
	重力探査 重力計									
	磁力探査 磁力計									
	地震探査	3				○				
	ストリーマーケーブル									
	エアガン									
	海底地震計									
	海底ケーブル									
	電磁探査									
	音響探査									
	マルチビーム計深機									
	計量魚群探知機									
	サブボトムプロファイラー									

## 第2章 海洋開発の技術体系

表 2.1.2 海洋資源開発技術マップ（探鉱期）

内容	主な構成機器等	自然環境	荷重と応答	位置保持	メンテナナンス	通信・制御	設計	施工	特殊技術	その他
(2) 探鉱期										
物理探査										
	物理探査船	3	4	5		○				
	地震探査	3				○				
	ストリーマケーブル									
	エアガン									
	海底地震計									
	海底ケーブル									
試掘										
	掘削施設	3	4	5	○	○	○	○		
	船型									
	セミサブマージブル									
	ジャッキアップ									
	位置保持（係留）	3	4	5	○		7	○		
	係留ライン									
	チェーン									
	鋼製ワイヤー									
	合成繊維索									
	アンカー									
	Drag Anchor									
	Vertical Loaded Anchors									
	Suction Pile Anchor									
	Driven Pile Anchor									
	係留システム	3	4	5	○		7	○		
	Catenary									
	Taut									
	Semi-Taut									

## 第2章 海洋開発の技術体系

内容	主な構成機器等	自然環境	荷重と応答	位置保持	メンテナンス	通信・制御	設計	施工	特殊技術	その他
位置保持 (DPS)	スラスターシステム	3	4	5	○	5	7	○		
	パワーシステム									
	DP制御システム									
	Computer System									
	Joystick System									
	Sensor System									
	Display System									
	Position Reference System									
掘削設備	デリック									
	トップドライブ									
	ヒープコンペンセーター									
	ドロワークス									
	ロータリーテーブル									
掘削用ライザーシステム	ライザーテンショナー									
	マリンライザー									
	フレックスジョイント									
	ガイドラインテンショナー									
	泥水循環システム									
	泥水ポンプ									
	ハイドロサイクロン									
	掘削泥水									
	ベントナイト									
	リグノスルホネート									
	ポリマー									
	油系									
	BOP									
	アニューラー型 / ラム型									

## 第2章 海洋開発の技術体系

内容	主な構成機器等	自然環境	荷重と応答	位置保持	メンテナナンス	通信・制御	設計	施工	特殊技術	その他
ドリルストリング	スイベル									
	ドリルビット									
	PDCビット									
	ダイヤモンドビット									
	ローラーコーンビット									
	ドリルパイプ		○		○				6	
	ヘビーウェイトドリルパイプ									
	ドリルカラー									
	コアリングシステム									
	ピストンコアラー									
	コアビット									
	ケーシング	ケーシングパイプ		○						
セメント										
オフショア支援船 (OSV)	PSV									
	AHTS / AHTSV	3	4	5				○	6	
	MPSV									
	OSCV									
	DSV									
ROV	海底坑口装置用	3		○	○			○	6	
	ライザー結合用									
AUV		3		○	○	○			6	

第2章 海洋開発の技術体系

表 2.1.3 海洋資源開発技術マップ (FS期)

内容	主な構成機器等	自然環境	荷重と応答	位置保持	メンテナナンス	通信・制御	設計	施工	特殊技術	その他
(3) FS期										
技術検討										
生産施設										
固定式プラットフォーム										
	GBS									
	ジャケット									
	ジャッキアップ									
	コンプライアントタワー									
浮体式生産システム										
	FPSO	3	4	5	○		7	○		
	FPS									
	TLP									
	SPAR									
	FSO									
	FSRU									
	FSU									
	FLPG									
	FLNG									
位置保持 (係留)										
係留ライン										
	チェーン									
	鋼製ワイヤー									
	合成繊維索									
アンカー										
	Drag Anchor	3	4	5	○		7	○		
	Vertical Loaded Anchors									
	Suction Pile Anchor									
	Driven Pile Anchor									
係留システム										
	Catenary									
	Taut									
	Semi-Taut									

## 第2章 海洋開発の技術体系

内容	主な構成機器等	自然環境	荷重と応答	位置保持	メンテナンス	通信・制御	設計	施工	特殊技術	その他
	Turret									
	External									
	Internal	3	4	5	○		○	○		
	Disconnectable Internal									
	スイベル									
	海底生産設備									
	wellhead									
	フローライン・パイプライン									
	マニフォールド									
	セパレータ	3			○	○	○	○	6	
	ブースターポンプ									
	配電設備									
	アンビリカルケーブル									
	BOP									
	生産用ライザーシステム									
	Steel Catenary Riser									
	Lazy wave / Steep wave	3	4	5	○	○	○	○	6	
	Vertical Riser									
	フレキシブルライザー									
	Hybrid Riser									
	出荷装置									
	ローディングホース									
	ローディングアーム									
	シャトルタンカー（出荷タンカー）									
	原油タンカー	3	4	○		○	○			
	LNGタンカー									
	フローティングホース									
	原油									
	LNG									
	パイプライン									
	リスクアセスメント									
	HAZID / HAZOP	3	4	5	○	○	7	○	6	○
	FTA / ETA									

## 第2章 海洋開発の技術体系

内容	主な構成機器等	自然環境	荷重と応答	位置保持	メンテナンス	通信・制御	設計	施工	特殊技術	その他
採取技術	ガスリフト生産									
	ポンプ採油					○			6	
	EOR法									
	IOR法									
掘削技術	水平掘削	○					○			○
	大偏距掘削									
	MLT:Multi Lateral									
油層評価	油層岩特性									
	油ガス層流体特性									
	排油機構									○
	坑井挙動									
	油ガス層スタディ									
	油層モデリング									
	油層シミュレーション									
経済的検討	採鉱計画									
	採算性の検討						○			
	埋蔵量評価									
	資源ポテンシャル									○
	生産井掘削（試掘と同じ）	3	4	5	○	○	7	○	6	○
	生産施設（FS期の技術検討と同じ）	3	4	5	○		7	○		
	生産設備（FS期の技術検討と同じ）	3	4	5	○		7	○	6	○
	位置保持（係留）（FS期の技術検討と同じ）	3	4	5	○		7	○		
	海底生産設備（FS期の技術検討と同じ）	3			○	○	○	○	6	
	ライザーシステム（FS期の技術検討と同じ）	3	4	5	○	○	○	○	6	

## 第2章 海洋開発の技術体系

	自然環境	荷重と応答	位置保持	メンテナナンス	通信・制御	設計	施工	特殊技術	その他
内容	主な構成機器等								
設置									
オフショア支援船 (OSV)	3	4	5		○		○		
Pipe Lay (J-Lay, S-Lay, Reel-Lay)									
PSV									
AHTS									
クレーンバージ									
セミサブクレーンバージ									
タグボート									
カーゴバージ									
テスト生産						7			

## 第2章 海洋開発の技術体系

表 2.1.4 海洋資源開発技術マップ（生産期・終結期）

内容	自然環境	荷重と応答	位置保持	メンテナンス	通信・制御	設計	施工	特殊技術	その他
（４）生産期									
生産・操業管理									
生産施設（FSの生産施設と同じ）	3	4	5	○		7		6	
位置保持（係留）（FS期の技術検討と同じ）	3	4	5	○		○	○		
ライザーシステム（FS期の技術検討と同じ）	3	4		○	○	7	○	6	
貯蔵（LNGタンク）									
モス	3	4		○		7			
メンブレン									
SPB									
出荷装置（FS期の技術検討と同じ）	3	4	5		○	7	○	○	
浮体上設備									
発電機									
圧縮機									
ボイラー / 蒸気タービン									
浮体上坑口装置（ドライツリー）									
セパレータ（2相・3相）									
重力式 / サイクロン式									
原油処理装置									
エマルジョン処理									
スタビライザー									
脱塩装置					○	○			○
ガス処理装置									
脱湿法 / 酸性ガス処理									
排水処理装置									
水圧入用装置									
ガス圧入装置									
遠心式 / レシプロ式									
制御システム									
空気圧式									
油圧式									
電気式									

## 第2章 海洋開発の技術体系

内容	主な構成機器等	自然環境	荷重と応答	位置保持	メンテナンス	通信・制御	設計	施工	特殊技術	その他
海底生産設備	wellhead									
	フローライン・パイプライン									
	マニフォールド									
	セパレータ									
	ブースターポンプ									
	コンプレッサー									
	配電設備	○			○	○	7	○	6	
	アンビリカルケーブル									
	ジャンパー									
	テンプレート									
	海底坑口装置（ウェットツリー）									
	Vertical Tree / Horizontal Tree									
	海底ポンプ									
	多相流									
	単相									
計量装置	多相流量計					○				○
生産管理	遠隔通信					○	7			
	IOT									
操業管理					○	○				
メンテナンス	浮体				○		○			
	パイプライン									
ROV	付着物除去用			○	○	○				
	海底パイプライン保守点検用									
(5) 終結期										
廃坑・施設撤去							○			
	掘削施設（試掘と同じ）	3	4	5	○		7	○		
	オフショア支援船（試掘と同じ）	3		5		○				

## 第2章 海洋開発の技術体系

### 2.2 海洋再生可能エネルギー開発の技術的俯瞰

海洋再生可能エネルギーはエネルギー源として、太陽光・風力・波力・潮流・潮汐力・海水温に大別でき、それぞれのエネルギー源を電力に変換する。

いずれの海洋再生可能エネルギーの開発方法も、石油・天然ガス開発とほぼ同様の開発スキームとなっており、ここでは、風力発電を例にとって各開発スキームの概要を説明する。

#### 2.2.1 開発スキーム

ここでは前述のとおり、風力発電について、その開発スキームについて概要及びイメージ図を示す。

まず、風車をどこに設置するか立地環境およびその設置位置における気象・海象の調査を行う（立地環境調査期）。その後、立地環境に即した風力発電施設の基本設計（FEED：Front End Engineering and Design）および実施設計を行い（基本設計・実施設計期）、建設工事を実施し（建設工事期）、実際に発電を行う（事業期）。事業終了後は撤去・解体する（終結期）。



図 2.2.1 風力発電の開発の流れ

#### (1) 立地環境調査期

立地環境調査期では、設置候補地の自然条件および社会条件の調査をまず実施する。自然条件としては発電量予測の基となる風況の実測・シミュレーションを行う。設置環境が洋上の場合には風況に加えて波浪・潮流についても把握しておく必要がある。一方、社会条件としては、海域の利用に関して、さまざまな法令の制約があるため、関連法規及び関係官庁の許認可等の調査を行う必要がある。

#### (2) 基本設計・実施設計期

基本設計・実施設計期は海洋資源開発では FS 期に相当し、基本設計と実際に設置工事を行うための実施設計を行う。

洋上における風力発電施設のイメージ図を図 2.2.2 に示す。

風力発電施設そのものは大別すると風を受けるブレード（ローター）、発電機や増速機等が格納されているナセル、これらを支持するタワー部があり、浮体式の場合このタワー部を支持する浮体式支持構造物とそれを位置保持する係留施設、さらには発電した電力を送電する海底ケーブルに分けられる。

ブレードの大きさは風況および発電量から決まり、ブレードサイズによってタワーの高さが決まる。また、支持構造物はブレード、ナセル、タワー等の上載構造物と波浪・潮流などの気象・海象条件等から決定する。

## 第2章 海洋開発の技術体系

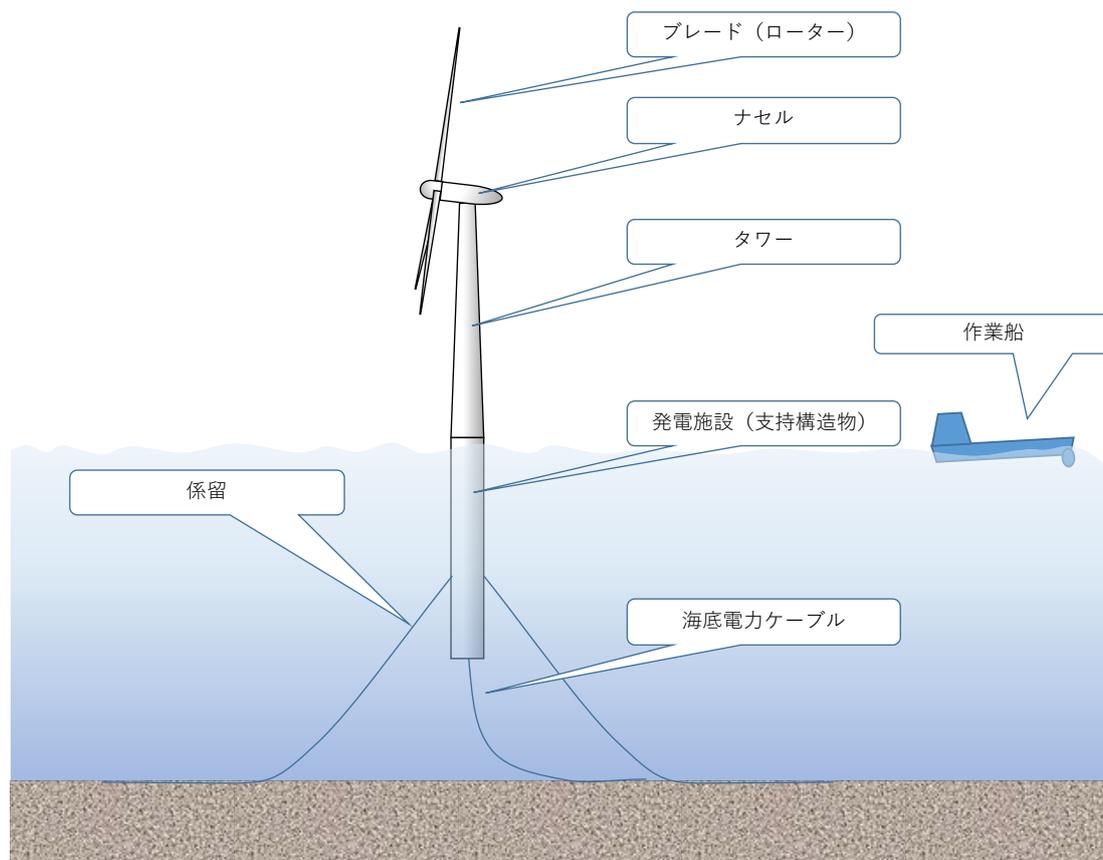


図 2.2.2 洋上風力発電イメージ図

### (3) 建設工事期

建設工事期では、設計されたタワーや浮体式支持構造物などの製作を行う。また、土木工事等が含まれる場合もある。

発電施設の設置は係留システムの設置から始まり、浮体式支持構造物を設置し、その後タワー、ナセル、ブレードを設置する方法や、造船所などで浮体に上載構造物を載せた後に、設置海域まで曳航し係留システムに繋ぐ方法などがある。

### (4) 事業期

設置工事完了後、実際に発電する運転に入り、メンテナンスが主要な作業となる。海底資源開発では、海底面にあるサブシーシステムなどのメンテナンスはダイバー作業ができない水深となるため AUV や ROV などの海中ロボットによる。一方、風力発電の場合は、目視検査ができるものの、ブレード部を検査することは困難となるため、ドローンなどによる検査が期待される場所である。

## 第2章 海洋開発の技術体系

### (5) 終結期

事業終了後は設置した設備を撤去する必要がある。撤去作業は設置作業の順番を逆にしたような格好となる。

### 2.2.2 技術マップ

海洋資源開発と同様に、上述の開発スキームに沿って、各スキームで必要となる構成機器類・技術を抽出し、各構成機器類・技術を「自然環境」「荷重と応答」「位置保持」「メンテナンス」「通信・制御」「設計」「施工」「特殊技術」「その他」の分野へ対応させたものを表2.2.1～表2.2.3にまとめている。なお、表中の数字は本書で記載している章を示しており、○印は本書に記載していないが、対応している項目であることを示している。

## 第2章 海洋開発の技術体系

表 2.2.1 海洋再生可能エネルギー技術マップ（立地環境調査期）

内容	主な構成機器等	自然環境	荷重と応答	位置保持	メンテナンス	通信・制御	設計	施工	特殊技術	その他
(1) 立地環境調査期										
エネルギーポテンシャル評価										
風況										
	シミュレーション									
	全球モデル / メソモデル									
	風速計									
	風車式									
	風杯式									
	超音波式									
	リモートセンシング									
	レーザー式 / 音波式									
	実測データ解析									
波浪										
	シミュレーション									
	全球モデル									
	メソモデル									
	波浪推算モデル									
	波浪計									
	固定式									
	ブイ式									
	GPS式									
	レーダー式									
	リモートセンシング									
	レーダー式									
	実測データ解析									

## 第2章 海洋開発の技術体系

内容	主な構成機器等	自然環境	荷重と応答	位置保持	メンテナンス	通信・制御	設計	施工	特殊技術	その他
潮流・海流	シミュレーション	3								
	海洋循環モデル									
	流速計									
	翼車式									
	電磁式									
	超音波式									
	ドップラー式									
水温	短波式									
	シミュレーション	3								
	海洋循環モデル									
	水温計									
海底調査										
水深	音響測深	3								
	マルチビームソナー									
	サイドスキャンソナー									
底質	音響探査	3								
	サブボトムプロファイラー									
	採泥									
	コアラー式									
	グラブ式									
	ドレッジ式									

## 第2章 海洋開発の技術体系

表 2.2.2 海洋再生可能エネルギー技術マップ（基本設計・実施設計期）

内容	主な構成機器等	自然環境	荷重と応答	位置保持	メンテナンス	通信・制御	設計	施工	特殊技術	その他
(2) 基本設計・実施設計期										
技術検討：風力発電										
発電施設（支持構造物）										
着底式										
モノパイル式										
Tri-pile式										
重力式										
ジャケット式										
		3	4		○		○	○		
浮体式										
セミサブ型										
スパー型										
TLP型										
バージ型										
係留										
係留ライン										
チェーン										
鋼製ワイヤー										
合成繊維索										
アンカー										
ドラッグ										
サクション										
		3	4	5			7	○		
落下式										
VLA										
重力式										
係留システム										
Catenary										
Taut										
TLP										
ローター										
水平軸型										
		3				○	○	○		
垂直軸型（ダリウス型）										
垂直軸型（直線翼型）										
タワー										
		3			○					
ナセル										
					○					

## 第2章 海洋開発の技術体系

内容	主な構成機器等	自然環境	荷重と応答	位置保持	メンテナンス	通信・制御	設計	施工	特殊技術	その他
技術検討：波浪発電										
発電施設	浮体式	3	4	5	○		7	○		
	その他（陸上設置など）									
発電形式	振動水柱型	3			○					
	並進動揺型									
	屈曲動揺型									
	越波型									
発電機構	タービン式				○	○				
	油圧式									
	リニアダイレクトドライブ式									
技術検討：潮流・海流発電										
発電施設	着底式	3	4	5	○		7	○		
	浮体式（風力発電と同じ）									
発電形式	水平軸型タービン	3			○	○				
	垂直軸型タービン									
	往復運動型									
技術検討：潮汐発電										
発電施設	貯水池	○								
	1貯水池1方向発電形式									○
	1貯水池2方向発電形式									
	2貯水池1方向発電形式									
	ラグーン									
発電形式	発電タービン	○								
	バルブ式				○	○	○			
	リム式									
	チューブラ式									

## 第2章 海洋開発の技術体系

内容	主な構成機器等	自然環境	荷重と応答	位置保持	メンテナンス	通信・制御	設計	施工	特殊技術	その他
技術検討：海洋温度差発電										
発電施設										
	陸上設置型									
	着底式									
	浮体式船型	3	4	5	○		○	○		
	バージ型									
	スパー型									
	セミサブ型									
発電機構										
	オープンサイクル									
	クロ-ランキンサイクル									
	カリーナサイクル	3								○
	ウエハラサイクル									
	ハイブリッド									
	作動流体									
深層水取水管										
	海底敷設型	3	○		○		○	○		
	浮体設置型									
技術検討：送電システム										
	洋上変圧施設（風力支持構造物に同じ）	3	4		○		○	○		
	海底電力ケーブル					○		○		
安全性評価										
水槽試験										
	波浪荷重	○	○				○			○
数値シミュレーション										
	係留系	○	○	○			○			
	連成解析									
	復原性									

## 第2章 海洋開発の技術体系

表 2.2.3 海洋再生可能エネルギー技術マップ（建設工事期）

内容	自然環境	荷重と応答	位置保持	メンテナンス	通信・制御	設計	施工	特殊技術	その他
主な構成機器等									
(3) 建設工事期									
発電設備設置									
発電施設（F/S期の内容と同じ）									
作業船									
クレーン船									
杭打ち船									
浚渫船									
SEP（Self Elevation Platform）台船									
台船									
ケーブル布設船									
輸送船	○			○			○		
重量物運搬船									
はしけ									
タグボート									
アクセス船									
AHTS船									
潜水作業支援船									
監視・警戒船									

## 第2章 海洋開発の技術体系

表 2.2.4 海洋再生可能エネルギー技術マップ（事業期・終結期）

内容	自然環境	荷重と応答	位置保持	メンテナンス	通信・制御	設計	施工	特殊技術	その他
（4）事業期									
操業管理									
発電量制御									
回転数制御					○	○			
ブレードピッチ角制御									
モニタリング									
IoT				○	○				
遠隔操作									
メンテナンス									
作業船									
予防的メンテナンス									
オンライン状態監視技術(CMS)				○	○				
定期検査									
修理メンテナンス									
海水防食									
電気防食				○					
塗装									
作業船									
アクセス船	○			○					
保守管理作業船									
（5）終結期									
施設撤去									
作業船(発電設備設置に同じ)	○						○		

## 第2章 海洋開発の技術体系

### 2.3 まとめ

本章では海洋資源開発と海洋再生可能エネルギー開発について、使用設備や構成機器を開発スキーム毎に整理した。

次章以降では海洋資源開発と海洋再生可能エネルギー開発において、基礎知識として知っておくべき事項について解説を行う。

まず、両開発の技術開発面での共通事項として「自然環境条件」、「浮体および固定構造物に作用する荷重と応答」、「浮体構造物の位置保持」についてそれぞれ第3章から第5章で説明する。

また、今後、日本国内で開発が進められる可能性のあるメタンハイドレートや熱水鉱床といった海底資源開発においてはサブシーシステム（海底面に設置する装置）が重要となると考えられるために、現在石油・ガス開発において用いられている「サブシーシステム」について、第6章で解説する。

最後に「海洋構造物の設計の流れ」を第7章で解説する。

#### <参考資料>

- 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. 海洋開発工学概論第I部 海洋資源開発編第1版. 国土交通省, 2017, 460p.
- 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. 海洋開発工学概論第II部 海洋再生可能エネルギー編第1版. 国土交通省, 2017, 293p.
- 滝山博志;大村亮;正岡功士他. 海水溶存資源の総合的利用技術. 日本海水学会誌. 2010, 第64巻, 第6号, p.318-322.
- (一財) エンジニアリング協会. 海水中レアメタル等補修可能性調査報告書. 平成25年3月. <http://www.ena.or.jp/?fname=24-56-3.pdf>, (参照 2020-12-30).
- 大井健太. 海水、かん水からのリチウムの吸着回収技術. 地質ニュース. 2010, 670号, p.60-69.
- (社)日本船舶海洋工学会海中技術委員会. 海洋底掘削の基礎と応用. 成山堂書店, 2012. 186p.
- 日本財団オーシャンイノベーションコンソーシアム. ”メタンハイドレート・海洋鉱物資源”. 日本財団. [http://project-kaiyoukaihatsu.jp/industry/methane\\_hydrate.shtml](http://project-kaiyoukaihatsu.jp/industry/methane_hydrate.shtml), (参照 2020-12-30).
- Schlumberger 社 . ”DL Annular BOP” . Schlumberger 社 . <https://www.slb.com/drilling/rigs-and-equipment/pressure-control-equipment/annular-bops/dl-annular-bop>, (cited 2020-12-30).
- SIMTEC PROCESS SOLUTIONS. “The essence of any flow assurance problem lies in recognising the fluid properties of the system”. SIMTEC PROCESS SOLUTIONS. <http://www.simtec-ps.com/services/production-chemistry-support/>, (cited 2017-11-01).

### 3 自然環境条件

#### 3.1 はじめに

本章においては海洋構造物を設計する上で最も基本的な情報となる自然環境条件について述べる。海洋構造物を設計するエンジニアは自然環境条件を適切に設定しなければならない。なぜなら自然環境条件を低く見積もった場合、構造の破壊等を招き重大な事故につながる可能性がある。一方、自然環境条件をあまりにも厳しく見積もった場合はオーバースペックとなりコスト的な面で損失を与えることになる。また海洋再生可能エネルギーに関しては誤った自然環境条件を設定することで十分な発電量を得られない可能性もある。

そこで本章ではまず海洋構造物を設計する上で考慮すべき波・風等の自然環境要素を取り上げ、次にそれらの自然環境要素をどのように取り扱い評価することで適切に自然環境条件を設定することができるかを解説する。なお、本章においては石油地質学的な問題は取り上げない。

#### 3.2 自然環境要素

海洋構造物にとって特に重要な自然環境要素としては波、風、潮流 (tidal current) ・海流 (ocean current) が挙げられる。これらは海底資源を開発する上では基本的に障害となるものであるが、海洋再生可能エネルギーの観点からは有益な資源と考えることもできる。一方、極地に近い海域では冰山や海氷はいずれの海洋構造物にとっても危険な存在である。また海底地形や底質は、海洋構造物の係留やサブシー機器を設置する上で重要な情報となる。そこで本節ではこれらの自然環境要素について述べることとする。

##### 3.2.1 波

海洋構造物が洋上にある限り常に晒されることになる主要な外力源が波である。洋上で遭遇する波には主に4種類あり、風によって生じる波の総称である「波浪」と地震や海底地滑り等によって引き起こされる「津波 (tsunami)」、月や太陽からの万有引力によって引き起こされる「潮汐 (tide)」、台風などの大型の低気圧による吸い上げ効果と吹き寄せ効果によって発達する「高潮」が挙げられる。津波の発生頻度は非常に低く、潮汐、高潮の波周期は数時間と非常に長いため、海洋構造物の設計においては波周期が比較的海洋構造物の動揺の固有周期 (natural period) に近い波浪が主な評価対象となる。波浪は主に「風波 (wind wave)」と「うねり (swell)」の2種類の波に分けられ、波浪はその発生原因である風が時空間的に不規則であるため不規則波 (irregular wave) として取り扱う必要がある。

##### (1) 波の基本的な性質

沖合の比較的長い波長を持つ波を観察していると、ほとんど減衰することなく伝播していく様子が見られる。このように波長に比べ波高が小さい波を微小振幅波もしくは線形波と呼び、2次元の場合には式 (3.2.1) のような正弦波として表すことができる。この表現式で表される波は単一の波高、周期を持つため規則波 (regular wave) と呼ばれる。

$$\eta = a \sin(kx - \omega t) \quad (3.2.1)$$

ここで $\eta$ は水面変位、 $a$ は波振幅、 $k(=2\pi/\lambda)$ は波数、 $\lambda$ は波長、 $x$ は空間座標、 $\omega(=2\pi/T)$ は波の円周波数（角周波数とも言うが、ここでは円周波数で統一する）、 $T$ は波周期、 $t$ は時間であり、式(3.2.1)を図式化したものが図3.2.1である。式(3.2.1)と図3.2.1より波は時空間に対して伝播していく特性を持つことがわかる。

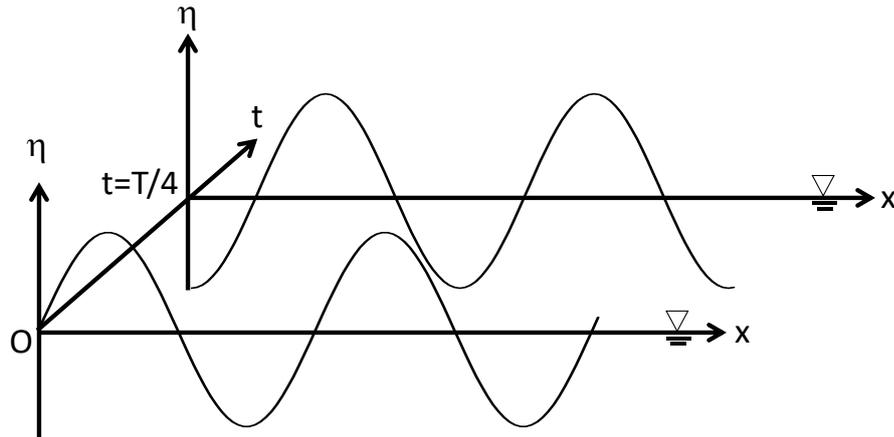


図 3.2.1 時空間的に伝播する正弦波

このような単純な正弦波で取り扱える理論一般を微小振幅波理論 (airy wave theory) と呼び、比較的単純で取り扱いやすく、実用的に必要なほとんどの波に適用できるため工学的な問題で多用される。また微小振幅波理論において波の重要な性質として波数（あるいは波長）と波の円周波数（あるいは波周期）と水深の間に成り立つ式(3.2.2)に示される「波の分散関係 (dispersion relation)」が挙げられる。

$$\omega^2 = gk \tanh(kh) \quad (3.2.2)$$

ここで $g$ は重力加速度、 $h$ は水深であり、水深が波長に対して大きい場合は式(3.2.2)において $\tanh(kh) \rightarrow 1$ となるので、分散関係式は更に簡易な形になる。また波の分散関係から波の位相速度（以下、波速）が式(3.2.3)で表される。

$$c = \frac{\lambda}{T} = \frac{\omega}{k} = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh(kh)} \quad (3.2.3)$$

一方で、波のない水面に手で振動を与えて波を起こした場合、よく観察すると波は伝播しているが先頭の波は次々と消えていることに気付くであろう。これは波のエネルギーの伝播速度と波の位相速度に差があるためである。波のエネルギーが伝わる速度は群速度 $c_g$ と呼ばれ、十分に深い海では位相速度の1/2の速度になる。

実際の海の波をよく観察すると図3.2.2のように正弦波に比べると峰はとがり、谷のへこみは小さい波があることに気付く。このような波をストークス波(Stokes wave)と呼び、

### 第3章 自然環境条件

波形やその他の水理特性を正弦波の無限級数の形で表すため、微小振幅波に比べると取り扱いが難しくなる。このストークス波は主に波高が大きく水深・波長比が大きい場合に適用される。一方、波高が大きく水深・波長比が小さい場合はストークス波よりとがった峰と平たい谷をもつ図 3.2.3 のようなクノイド波 (Cnoidal wave) として取り扱われる。

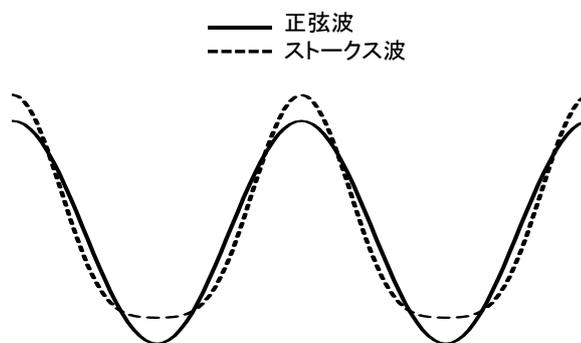


図 3.2.2 正弦波とストークス波の波形比較



図 3.2.3 パナマ沿岸で見られた典型的なクノイド波

(出典：Castro-Orgaz and Hager. (2017) )

#### (2) 波の分類

海を観察していると、サーフィンに適したような大きく長い波から、さざ波のような小さく短い波まで、様々な波が交じり合っているのが分かる。以下では海の波に含まれる種類について述べる。

##### ① 風波

波が発達する主要な原動力は風であり、波の表面において風との摩擦によって水面が押されることで波が造られる。よって、波の進む速さ (以下、波速) より風速が大きければ、波は風に押され続け発達していく。このようにある風域 (一様な風速、風向の風

### 第3章 自然環境条件

が吹いているとみなせる海域)で発達過程にある波を風波もしくは風浪と呼ぶ。発達した波ほど波高と波長は大きくなり、それに伴って波速も大きくなる。よって風の向き(以下、風向)が安定している場合は観測地点の風向と風波の向きはほぼ一致していることが多い。

また風波は風域においてどれ程の距離を風に吹かれてきたか(吹送距離)、どの位の時間を風に吹かれていたか(吹送時間)によって変化し、吹送距離、吹送時間が長ければ長いほど波高、波長は大きくなる。

#### ② うねり

うねりは風域から外へ伝播した波で、基本的に波長の短い波は比較的減衰しやすい。そのため、うねりの波長は風波に比べ長く、遠くの風域から伝播してくる波はその風域で発達した波の中で比較的波長の長い波だけが伝わってくる。したがって、図3.2.4のように波長が揃ったうねりが発生することがある。またうねりの方向はその性質上、風波と異なり観測地点の風向とは無関係な方向から伝わってくる。台風によって発達した波がうねりとして台風から離れた天候が穏やかな海岸に押し寄せることがあり、特に夏に日本の南方で発生した台風によって発生するうねりは土用波としても知られる。



図 3.2.4 沖合でのうねり

(出典 : MiraCosta College, Oceanography 101)

#### ③ 津波

津波は地震もしくは海底火山活動による海底地形の急変により発生し、数 km～数百 km におよぶ非常に長い波長の波として四方に高速で伝播する。津波は風によって発達する波浪とは異なり、沖合では波長が非常に長く、波高もそれほど大きくないため沖合の海洋構造物に被害をもたらすことはまれである。しかし、海岸に近付くにつれて水深が浅くなり急激に波高が大きくなり、波長が短くなるため、特に港湾設備や沿岸域に設置されている海洋構造物に対しては甚大な被害をもたらすおそれがある。

### 第3章 自然環境条件

以下に東日本大震災（平成23年東北地方太平洋沖地震）時の津波について述べる。津波の起因となった地震の震源域は三陸沖で気象庁の解析では震源域は長さ約450km、幅約150kmにわたり、最大すべり量は約30mであったと推定された。また海上保安庁の観測では震源のほぼ真上の宮城県沖では東南東に約24m移動し、約3m隆起していた。海底の推定すべり量を図3.2.5に示す。また地震発生15分後に岩手南部沖GPS波浪計で観測された津波の波形を図3.2.6に示す。図3.2.6から第1波が突出して高く7m近い波高を記録しており、第2～7波で徐々に小さくなっている。また第4～7波では50分程度の周期を示しており、津波が来襲し始めてから潮位の観測値が全体的に55cm程上昇していることが分かる。最終的に沿岸に達した津波の高さを図3.2.7に示す。

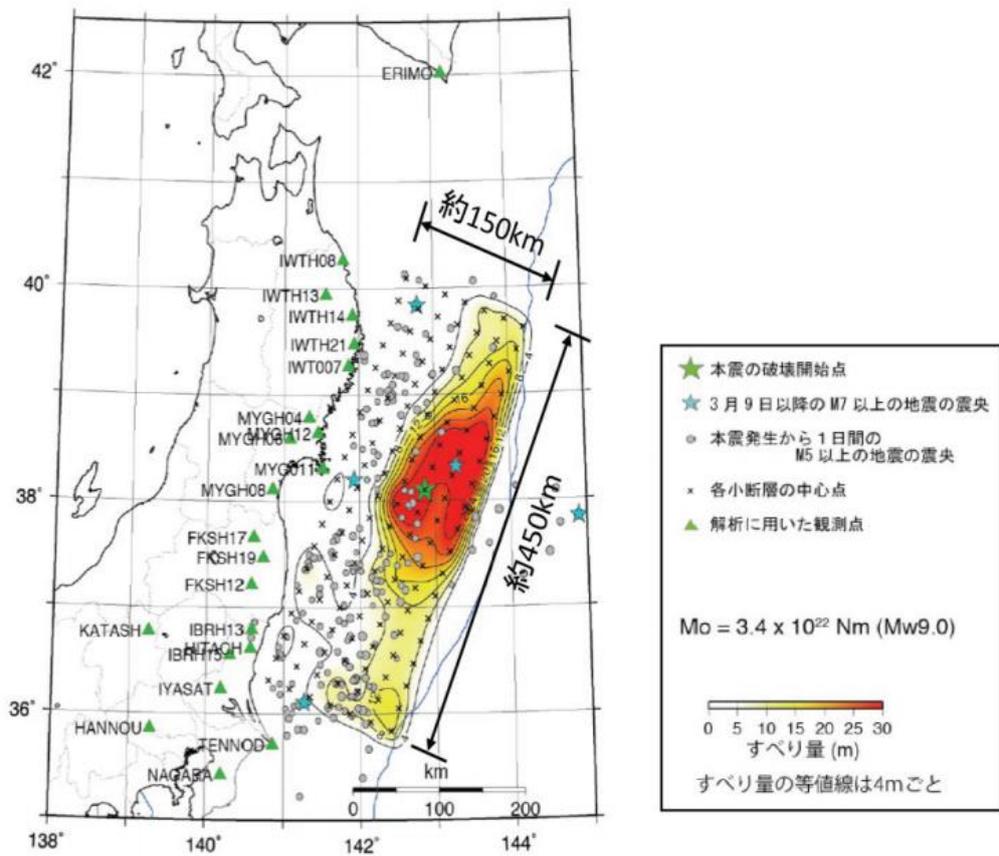


図 3.2.5 平成23年東北地方太平洋沖地震における推定すべり量

(出典：国土交通省（2012）)

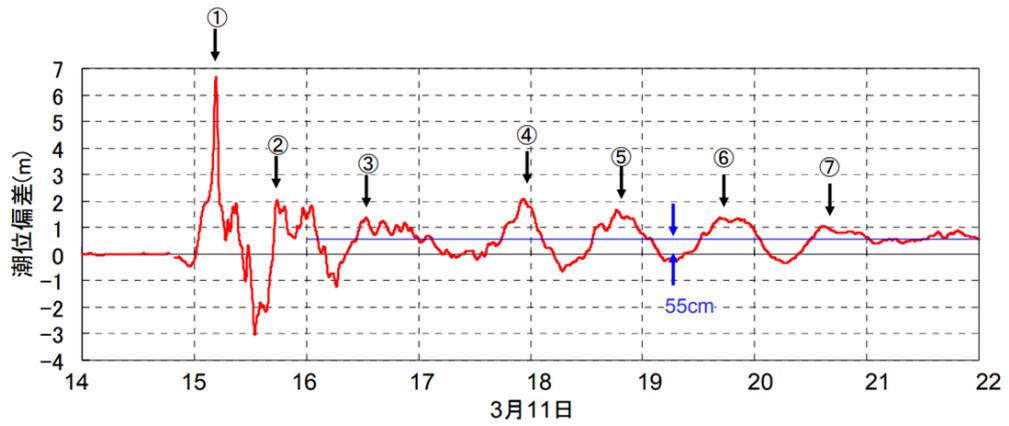


図 3.2.6 岩手南部沖 GPS 波浪計で捉えられた津波の波形

(出典：港湾空港技術研究所 (2011) )

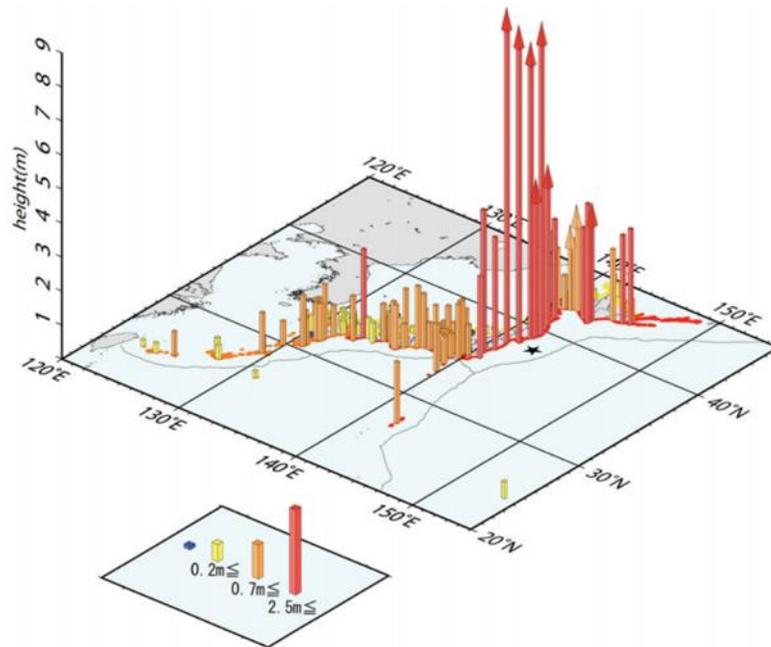


図 3.2.7 平成 23 年東北地方太平洋沖地震における津波観測状況

(出典：国土交通省 (2012) )

#### ④ 深海波・浅海波

深海波と浅海波の区別は単純に水深だけでなく、水深と波長の比で決まる。水深・波長比  $h/\lambda=1/2$  以上で深海波、 $h/\lambda=1/20-1/2$  は浅海波として取り扱われる。地球の海全体の平均水深は約 3,800m であり、太平洋の平均水深は約 4,300m 程度であるため、沖合で発生した津波でも波長が数 km～数百 km あれば、十分に浅海波として取り扱うことができる。

#### (3) 不規則波の取り扱い

実際の海において波浪は式 (3.2.1) のような規則的な波 (規則波) ではなく一定の振幅、周期を持たない不規則な波 (不規則波) として観測される。一方で、不規則波は様々な振

### 第3章 自然環境条件

幅、周期、位相をもつ規則波の重ね合わせとして表現できる。不規則波を構成する各周波数の規則波のことを成分波と呼ぶ。図 3.2.8 中の左側は規則波（成分波）4種類であり、これを足し合わせると図 3.2.8 右側の不規則波となる。一見ランダムに見える海の不規則波においても、その波高や波周期等の発生する頻度（確率）にはある程度共通する傾向が見られる。その傾向を特定し複雑な不規則波を工学的に取り扱うために統計的な手法を用いるのが一般的である。以下に不規則波の統計的な取り扱い方について述べる。

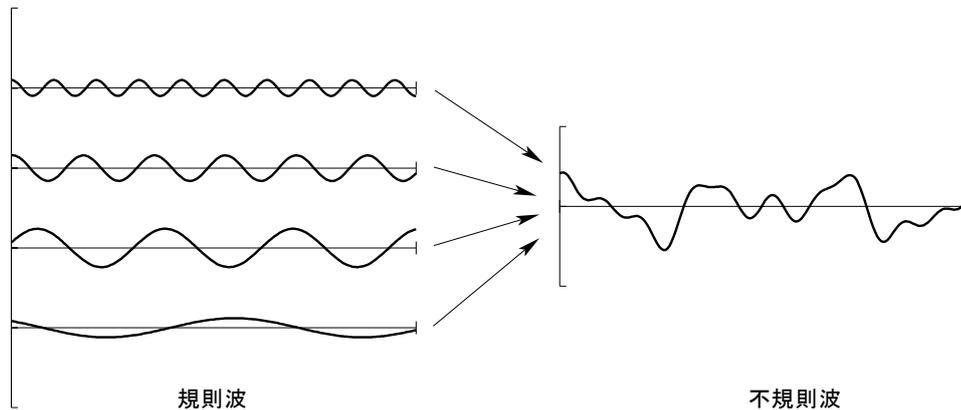


図 3.2.8 規則波と不規則波

#### ① 代表波

不規則波の波高や波周期を統計的に取り扱うためにまずは観測された波形を1つ1つ切り分けて定義する必要があるが、その切り分け方としてゼロアップクロス法（zero up crossing method）およびピークトゥピーク法（peak to peak method）がある。図 3.2.9 に両方法による切り分け例を示す。

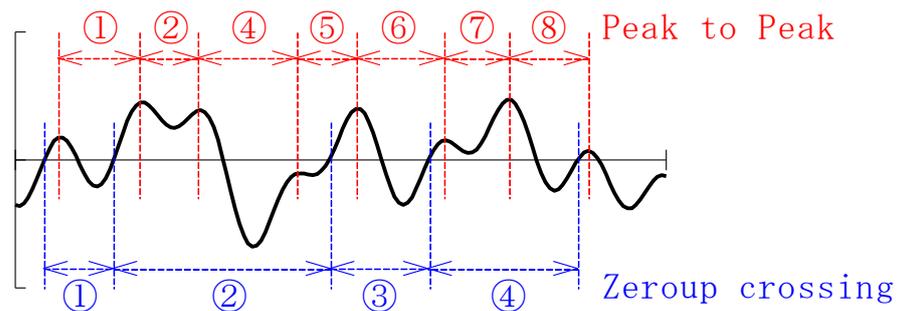


図 3.2.9 ゼロアップクロス法及びピークトゥピーク法による波浪観測例

図 3.2.9 中青色で示すゼロアップクロス法は、波形が波の谷から山へ向かって上昇し、水位ゼロの線を横切る点（ゼロアップクロス点）から、次のゼロアップクロス点の間を1つの波として定義する。ここで2つのゼロアップクロス点間にある細かい凸凹は無視する。図 3.2.9 では4個の波に切り分けることができる。切り分けられた個別の波はその波高と周期を読み取る必要がある。波高はゼロアップクロス点の間の波の山で一番高

### 第3章 自然環境条件

い所と波の谷の一番低い所の高低差で定義され、波周期はその波の始まりのゼロアップクロス点から終わりのゼロアップクロス点までの時間で定義される。なお、波形が波の山から谷へ向かって下降し、水位ゼロの線を横切る点（ゼロダウンクロス点）を元に波を切り分ける手法をゼロダウンクロス法（zero down crossing method）という。ゼロアップクロス法とは統計的に同等である。

一方、ピークトゥピーク法は凸点もしくは凹点で切り分けてゆく方法である（図 3.2.9 中赤色参照）。ゼロアップクロス法では無視したゼロ点を通らない凹凸も考慮するため、切り分けた個数がゼロアップクロス法よりも多い 8 個となっている。

波を統計的に取り扱う場合、波のサンプル数が少なすぎると統計誤差が大きくなるため、ある程度長時間観測する必要がある、連続で約 100 波程度の観測が一つの標準である（実際の海域での平均的な波の周期を 12sec 程度とすると、1200sec (20min) は観測が必要）。

このようにして、連続した不規則波から切り分けられた波を用いると、その不規則波を特徴付ける以下のような代表的な波が定義される。

i) 最大波： $H_{max}, T_{max}$

観測された波群の中で最も波高が大きい波の波高を  $H_{max}$ 、その波周期を  $T_{max}$  で表す。

ii) 1/10 最大波： $H_{1/10}, T_{1/10}$

波群の中で波高の大きい方から数えて 1/10 の波（波群が 100 波なら上から 10 波）の波高を平均したものを  $H_{1/10}$ 、その同じ波の周期を平均にしたものを  $T_{1/10}$  で表す。

iii) 有義波（1/3 最大波）： $H_{1/3}, T_{1/3}$

波群の中で波高の大きい方から数えて 1/3 の波（波群が 100 波なら上から 33 波）の波高を平均したものを有義波高  $H_{1/3}$ 、その同じ波の周期を平均にしたものを有義波周期  $T_{1/3}$  と呼び、不規則波の代表的な指標として最も良く用いられ、 $H_{1/3}$  は感覚的に感じられる波高に近いともいわれている。また有義波（significant wave）の波高と周期は  $H_s, T_s$  と表される場合もある。

iv) 平均波： $\bar{H}, \bar{T}$

波群の全て波の波高を平均したものを  $\bar{H}$ 、全ての周期を平均にしたものを  $\bar{T}$  で表す。

#### ② 波高分布

図 3.2.9 で示されたような不規則波の波高の確率密度関数は正規分布ではなく、図 3.2.10 のようなレイリー分布（Rayleigh distribution）が一般的に適用できるとされている。ここでレイリー分布は波高  $H$  と平均波高  $\bar{H}$  の比  $x=H/\bar{H}$  を用いて式 (3.2.4) のように表される。

$$p(x) = \frac{\pi}{2} x \exp\left[-\frac{\pi}{2} x^2\right] \quad (3.2.4)$$

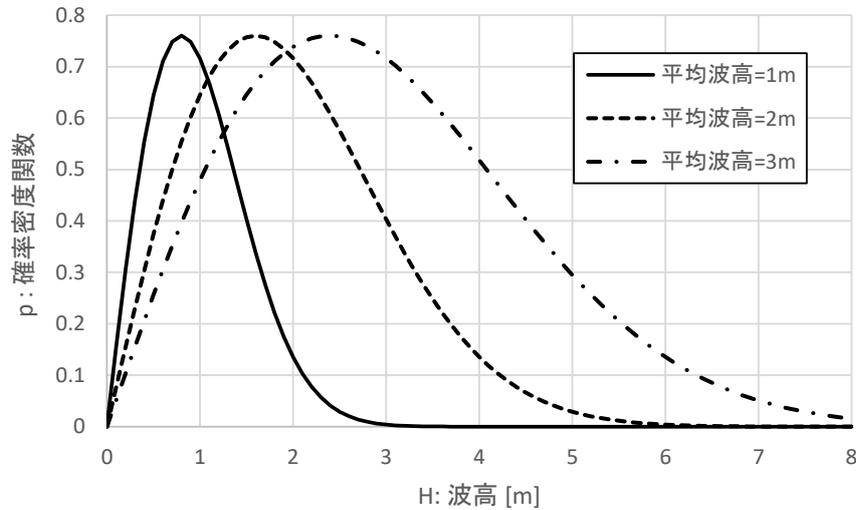


図 3.2.10 レイリー分布に従う確率密度関数の例

波高分布が式 (3.2.4) のレイリー分布で表される場合、解析的に  $H_{1/3}$  と  $\bar{H}$  の関係が式 (3.2.5) のように求められる。

$$H_{1/3} = 1.60\bar{H} \quad (3.2.5)$$

また  $H_{max}$  と  $H_{1/3}$  の関係も  $H_{max}/H_{1/3}$  の度数分布として解析的に表すことは可能であるが、 $H_{max}$  の定義上、 $H_{1/3}$  から  $H_{max}$  を一意に決めることはできず、確率的な表現に留まる。海洋構造物の設計においてはある程度の誤差を受容しながら  $H_{max}=2.0H_{1/3}$  が用いられることが多い。

### ③ 波周期分布

波群の中の波周期のばらつきは波高の場合より少なく、平均周期の 0.5~2.0 倍の範囲にあるものが多い。しかし、風波とうねりが重なっている場合は 2 山型の周期分布も見られる。このため波周期については波高のレイリー分布のような一般形が存在しない。しかしながら  $T_{1/3}$  や  $T_{max}$  などの代表波の波周期については多数の観測データから式 (3.2.6) のような関係が報告されている。

$$\begin{aligned} T_{max} &= (0.6\sim 1.3)T_{1/3} \\ T_{1/10} &= (0.9\sim 1.1)T_{1/3} \\ T_{1/3} &= (0.9\sim 1.4)\bar{T} \end{aligned} \quad (3.2.6)$$

### 第3章 自然環境条件

#### ④ 波スペクトル

不規則波の波形は一般に無数の正弦波（成分波）の重ね合わせとして表現できる。よってある観測点での波高の時間変化は式（3.2.7）のように表現することができる。ここで  $\eta_i$  は成分波の振幅、 $f_i$  は成分波の波周波数、 $\varepsilon_i$  は成分波の位相ずれである。

$$\eta(t) = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n \eta_i(2\pi f_i t + \varepsilon_i) \quad (3.2.7)$$

不規則波に含まれる波の周波数に対応する成分波のエネルギー（振幅そのものではない）の割合を示したものを波形のスペクトル（spectrum）といい、波の円周波数に対しては  $S(\omega)$ 、波周波数に対しては  $S(f)$  と表記する。以降は波周波数に対する  $S(f)$  を用いて表記する。

このスペクトルに関しては様々な表現式が提案されており、以下に代表的なものをいくつか示す。

#### a) ピアソン-モスコビッツ（Pierson-Moskowitz）スペクトル

十分に発達した風波の代表的なスペクトルであり PM（Pierson-Moskowitz）スペクトルとも呼ばれ、以下の式（3.2.8）で表される。ここで  $f=2\pi/\omega$ ,  $\alpha_{PM}=8.10 \times 10^{-3}$ ,  $\beta=0.74$ ,  $U_{19.5}$  は高さ 19.5m での風速である。

$$S(f) = \frac{\alpha_{PM} g^2}{(2\pi)^4} f^{-5} \exp\left(-\beta \left(\frac{g}{2\pi f U_{19.5}}\right)^4\right) \quad (3.2.8)$$

また有義波高  $H_{1/3}$  とピーク周期  $T_p$  を用いて式（3.2.9）のようにも表現できる。

$$S(f) = 0.312(H_{1/3})^2 T_p \cdot (T_p f)^{-5} \exp\left(-1.25(T_p f)^{-4}\right) \quad (3.2.9)$$

また、PM スペクトルを基礎とする、ITTC（国際試験水槽会議）や ISSC（国際船舶海洋構造会議）が提案した有義波高や平均波周期を用いて表現するスペクトルも、それぞれの目的に合わせた船の性能推定に良く用いられる。

#### b) JONSWAP 型スペクトル

PM スペクトルが十分に発達した風波のスペクトル形状であるのに対し、北海や日本海など、風の吹送距離が限られた海域のスペクトルとして用いられるのが Joint North Sea Wave Project（JONSWAP）において北海での計測値を用いて提案されたスペクトル表示式が式（3.2.10）である。

$$S(f) = \beta_j (H_{1/3})^2 T_p \cdot (T_p f)^{-5} \exp\left(-1.25(T_p f)^{-4}\right) \gamma_j \exp\left\{-\frac{(T_p f - 1)^2}{2\lambda^2}\right\} \quad (3.2.10)$$

ここで、 $f_p$ : ピーク周波数、 $\gamma_j$ : ピーク強調係数（JONSWAP の観測では 3.3）であり、

### 第3章 自然環境条件

また、

$$S(f) = \beta_j (H_{1/3})^2 T_p \cdot (T_p f)^{-5} \exp(-1.25(T_p f)^{-4}) \gamma_j \exp\left\{-\frac{(T_p f - 1)^2}{2\lambda^2}\right\},$$

$$\lambda = \begin{cases} 0.07 & \text{when}(f \leq f_p) \\ 0.09 & \text{when}(f > f_p) \end{cases}$$

である。

式 (3.2.10) の JONSWAP スペクトルは PM スペクトルの式 (3.2.8) と似通っており、図 3.2.11 のように PM スペクトルのピークを持ち上げたような形になっている。また合田 (1987) が提案する修正 JONSWAP スペクトルも有名である。

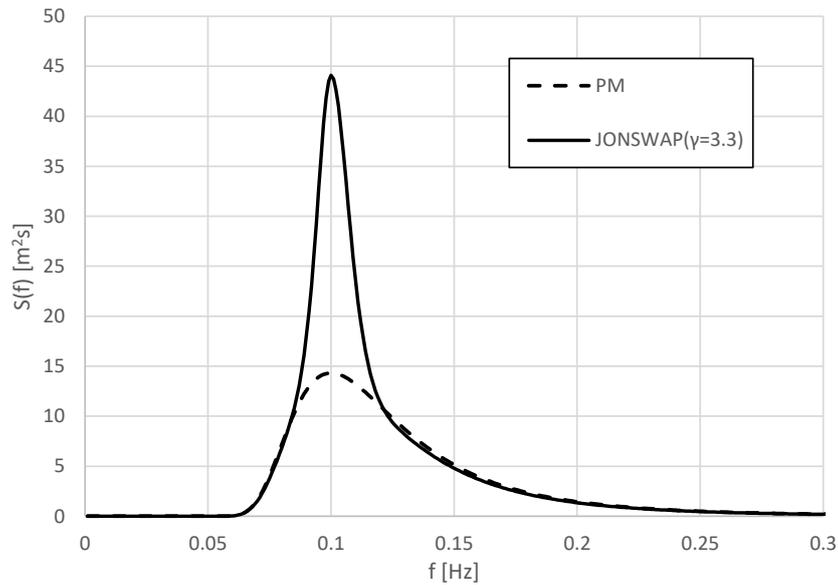


図 3.2.11 PM スペクトルと JONSWAP ( $\gamma=3.3$ ) の比較

#### c) Ochi-Hubble の 6 パラメータスペクトル

風波とうねりが共存する場合、風波は高周波数帯にピークを持ち、うねりは低周波数帯にピークを持つことから 2 つ山のスペクトル形状を示すことが多い。通常その場合は風波とうねりそれぞれのスペクトルを線形的に重ね合わせることで 2 つ山のスペクトルを再現することが多いが、Ochi and Hubble (1976) は 2 つ山が表現できる式 (3.2.11) のような 6 パラメータスペクトルを提案した。

$$S(f) = \frac{1}{4} \sum_{j=1,2} \frac{\left\{ \frac{(4m_j + 1)f_{pj}^4}{4} \right\}^{m_j}}{\Gamma(m_j)} \frac{H_{1/3j}^2}{f^{4m_j+1}} \exp\left\{ -\frac{4m_j + 1}{4} \left( \frac{f}{f_{pj}} \right)^{-4} \right\} \quad (3.2.11)$$

ここで  $j=1,2$  はそれぞれ低周波成分と高周波成分、 $f_{pj}$ : ピーク周波数、 $m_j$ : スペクトルバンド幅、 $H_{1/3j}$ : 有義波高、 $\Gamma$ : ガンマ関数、 $\gamma_j$ : ピーク強調係数である。

### 第3章 自然環境条件

#### d) 統計量

3.2.1(3)①で示した有義波高や平均波周期は時系列から得られる統計量である。一方、先に示した波スペクトルを用いて、これらの統計量を求めることができる。

まず、波スペクトルの  $n$  次モーメントを

$$m_n = \int f^n S(f) df \quad (3.2.12)$$

と表現すると、有義波高  $H_s$ 、ゼロアップクロス法での平均波周期  $T_z$ 、ピークトゥピーク法での平均波周期  $T_p$  は以下で表される。

$$\begin{aligned} H_s &= 4.0\sqrt{m_0} \\ T_z &= \sqrt{m_0/m_2} \\ T_p &= \sqrt{m_2/m_4} \end{aligned} \quad (3.2.13)$$

なお、これらのスペクトルと統計量の関係は海洋波だけではなく、後述する浮体の運動のスペクトルについても同様である。

#### ⑤ 方向スペクトル

平面 2 次元場における実際の海洋波の波向  $\theta$  は主な方向はあるもののよく観察すると様々な方向から伝播してきており、ある程度の分布を持っていることがわかる。そこで平面 2 次元波浪場のスペクトル  $S(f, \theta)$  は式 (3.2.14) のように上記で示した周波数スペクトル  $S(f)$  と方向分布関数 (directional spreading function)  $G(f, \theta)$  の積で示される。

$$S(f, \theta) = S(f) \times G(f, \theta) \quad (3.2.14)$$

方向分布関数  $G(f, \theta)$  は次元を持たず、以下のような形が用いられることが多い。

$$G(f, \theta) \propto \cos^{2s}(\theta/2) \quad (3.2.15)$$

ここで比例定数は 360 度で周回積分すると 1 となるように定義され、 $s$  は波の方向集中度を示すパラメータであり、様々な表示式が提案されており、代表的なものとして光易ら(1975)の式を以下に示す。

$$s = s_{max} \left( \frac{f}{f_p} \right)^\mu, \quad \mu = \begin{cases} 5 & : f/f_p \leq 1 \\ -2.5 & : f/f_p > 1 \end{cases} \quad (3.2.16)$$

ここで  $s_{max}$  は  $s$  の最大値であり、風波に対しては海面から 10m の高さの風速  $U_{10}$  を用いて  $s_{max} = 11.5(2\pi f_p U_{10}/g)^{2.5}$  であり、うねりに対しては 20 以上の値が適当であるとされ

### 第3章 自然環境条件

る。図 3.2.12 に  $s_{max}=20$  のときの光易型分布関数を示す。図 3.2.12 において  $f^*=f/f_p$  であることから波の周波数がピーク周波数に近いほど方向性が集中していることがわかる。

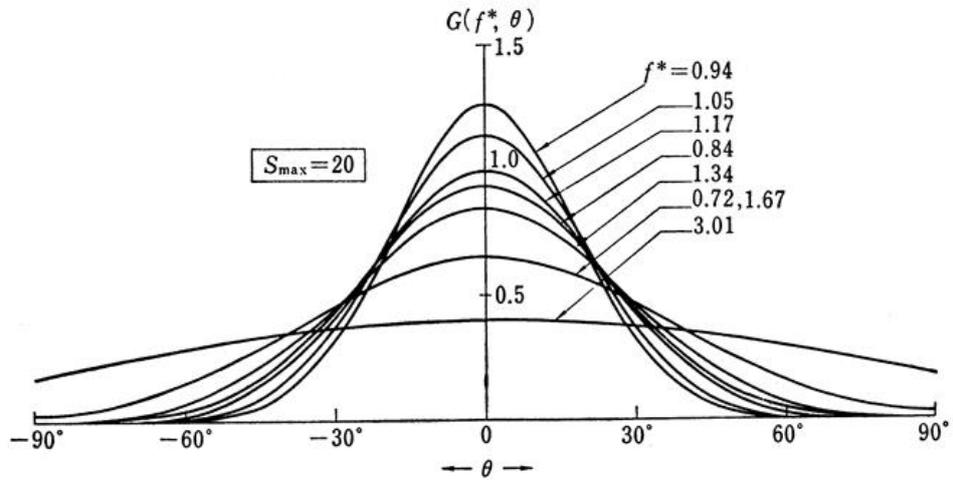


図 3.2.12 光易型方向分布関数 ( $s_{max}=20$ )

(出典：合田 (1987) )

#### ⑥ 度数分布表 (scatter diagram)

一般にあるデータの階級に分け、各階級の度数 (物事が起こった回数) を表の形式で表したものを度数分布表もしくは頻度分布と呼んでいる。

海洋構造物を設計するために海洋構造物の設置海域で長期間計測したデータや長期間の推算データを用いて、のような有義波高と有義波周期の結合頻度表や波高と風速、風速と風向等の様々な組合せの結合頻度表を作成し、当該海域での自然環境条件の統計的な特性を把握することが一般的である。

第3章 自然環境条件

表 3.2.1 沖縄県中城湾での有義波高・周期の結合頻度表 (1973~1999年)

波高	周期	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	合計	未超過	超過1	超過2									
1201~																			0	104294	104394	104396									
																			(0)	(1000)	(1000)	(1000)									
1101~1200																			0	104294	104394	104396									
																			(0)	(1000)	(1000)	(1000)									
1001~1100										1			1						21	104294	2104394	2104396									
										(0)			(0)						(0)	(1000)	(0)	(1000)									
901~1000											1	1	1						31	104292	3104292	3104394									
											(0)	(0)	(0)						(0)	(1000)	(0)	(1000)									
801~900									6	1	4	2	2		2				17	104289	17104289	17104391									
									(0)	(0)	(0)	(0)	(0)		(0)				(0)	(1000)	(0)	(1000)									
701~800									3	2	5	8	10	6					35	104272	35104272	35104374									
									(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)					(0)	(1000)	(0)	(1000)									
651~700									1	4	9	11	2	3		2			32	104237	32104237	32104339									
									(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)		(0)			(0)	(999)	(0)	(999)									
601~650									2	5	28	11	7	4					58	104205	58104205	58104307									
									(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)					(0)	(1000)	(0)	(1000)									
551~600									2	29	22	14	10	8	4	1			81	104147	81104247	81104249									
									(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)			(0)	(999)	(1)	(999)									
501~550									5	32	28	29	19	8	2	2			125	104066	125104166	125104168									
									(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)			(0)	(999)	(1)	(999)									
451~500									6	45	49	34	18	7	6				165	103941	165104041	165104043									
									(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)				(0)	(999)	(2)	(997)									
401~450									1	29	91	62	35	18	5				293	103776	293103776	293103778									
									(0)	(0)	(1)	(1)	(0)	(0)	(0)				(0)	(999)	(3)	(995)									
351~400									8	87	134	98	59	51	17	15	1		470	103483	470103583	470103585									
									(0)	(1)	(1)	(1)	(0)	(0)	(0)	(0)			(0)	(992)	(5)	(992)									
301~350									1	95	221	240	173	112	75	21	5		947	103013	947103113	947103115									
									(0)	(1)	(2)	(2)	(1)	(1)	(0)	(0)	(0)		(0)	(988)	(9)	(988)									
251~300									52	452	485	349	309	169	68	15	14	9	1925	102066	1925102166	1925102168									
									(0)	(4)	(5)	(3)	(3)	(2)	(1)	(0)	(0)	(0)	(18)	(979)	(18)	(979)									
201~250									17	530	1456	1039	765	465	232	91	23	9	4578	100141	4578100241	4578100243									
									(0)	(5)	(14)	(10)	(7)	(4)	(2)	(1)	(0)	(0)	(44)	(960)	(44)	(960)									
176~200									3	98	929	1222	838	532	259	120	57	20	4082	95563	408295663	408295665									
									(0)	(1)	(9)	(12)	(8)	(5)	(2)	(1)	(1)	(0)	(0)	(999)	(39)	(916)									
151~175									3	433	1750	1891	1238	680	287	128	42	16	6470	91481	647091581	647091583									
									(0)	(4)	(17)	(13)	(12)	(7)	(3)	(1)	(0)	(0)	(62)	(877)	(62)	(877)									
126~150									26	1206	3035	2822	1722	863	379	146	45	16	10251	85011	102578511	8511385113									
									(0)	(12)	(29)	(27)	(17)	(8)	(4)	(1)	(0)	(0)	(98)	(815)	(98)	(815)									
101~125									3	171	2677	4588	4436	2945	1293	413	195	39	16770	74760	1678474844	7484474844									
									(0)	(2)	(26)	(44)	(43)	(28)	(12)	(4)	(2)	(0)	(0)	(999)	(161)	(717)									
76~100									8	606	4217	7331	6744	4324	1612	394	93	15	25347	57990	2536889060	2536889062									
									(0)	(4)	(20)	(65)	(41)	(15)	(4)	(1)	(0)	(0)	(243)	(556)	(243)	(556)									
51~75									3	33	950	4272	6820	6935	3701	1137	214	43	24113	32643	2416032692	3269232692									
									(0)	(9)	(41)	(65)	(66)	(35)	(11)	(2)	(0)	(0)	(231)	(313)	(231)	(313)									
26~50									24	333	1085	1857	1686	1140	339	23	2		6489	8530	64918532	85328532									
									(0)	(3)	(10)	(18)	(16)	(11)	(3)	(0)	(0)		(62)	(82)	(62)	(82)									
~25									1960	2	4	15	14	18	7	1			2041	2041	20412041	20412041									
									(19)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)			(20)	(20)	(20)	(20)									
合計									1985	74	2099	14014	26907	27767	17795	8151	3151	1473	590	188	72	26	2	0	0	0	104294	104394	100104396	2	
									(0.18)	(19)	(20)	(40)	(134)	(258)	(266)	(171)	(78)	(30)	(14)	(6)	(2)	(1)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(1000)	(1000)	(1000)	(0)
未超過									1985	2059	4158	18172	45079	72846	90841	98792	101943	103416	104006	104194	104266	104292	104294	104294	104294	104294	104294	104294	104294	104294	104294
									(0.18)	(19)	(20)	(40)	(134)	(258)	(266)	(171)	(78)	(30)	(14)	(6)	(2)	(1)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(1000)	(1000)	(1000)	(1000)

(出典：港湾空港技術研究所 (2002) )

⑦ 波群

不規則な波浪において、高い波が数波続けて現れることがあり、このような現象は波群 (wave grouping) と呼ばれる。波群は海洋構造物に対し共振や浮体の長期周期動揺等の大きな影響を与えるため、様々な研究がなされている。波の連なり度合いを主眼に研究したものに Kimura (1980) や Lounguet-Higgins (1984) の研究がある。一方でエネルギーの集中として Funke and Mansard (1980) が考案した SIWEH (Smoothed Instantaneous Wave Energy History) を用いた方法がある。これは、水位変動  $\eta$  を三角フィルターにより平滑化した式 (3.2.17) で表され、GF (Groupiness Factor) は波群を表す統計量として用いる。

$$E(t) = \frac{1}{T_p} \int_{-T_p}^{T_p} \eta^2(t + \tau) \left(1 - \frac{|\tau|}{T_p}\right) d\tau \tag{3.2.17}$$

$$GF = \sqrt{\frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} \{E(t) - \bar{E}\}^2 dt} / \bar{E}$$

ここで  $E(t)$ : SIWEH、 $T_p$ : ピーク周期、 $T_0$ : 観測時間、 $\bar{E}$ : SIWEH の時間平均。

(4) 海洋波の推算

前述したように波が発達する主要な原動力は風であり、一般的に風浪の発達には風の吹送

### 第3章 自然環境条件

時間（連吹時間）、風速、および吹送距離によって支配されていると考えられている。その考えを基に簡易的に波浪の推算が可能な有義波法と計算は煩雑ながら有義波法に比べ正確な波浪推算ができるスペクトル法が開発された。以下にそれらの推算法について述べる。

#### ① 有義波法

有義波法は観測データを統一的に整理した結果より、不規則波を有義波の波高と周期で代表させ、その波を発生させる外的要因（風速、吹送時間、吹送距離及び水深）との関係を導き、この関係を利用して実用的な波浪予測を行うもので、風域を定常的なものとして取り扱い図 3.2.13 のような波浪推算図表を用いる SBM（Sverdrup, Bretschneider and Munk）法や移動風域を考慮した Wilson 法等が有名である。

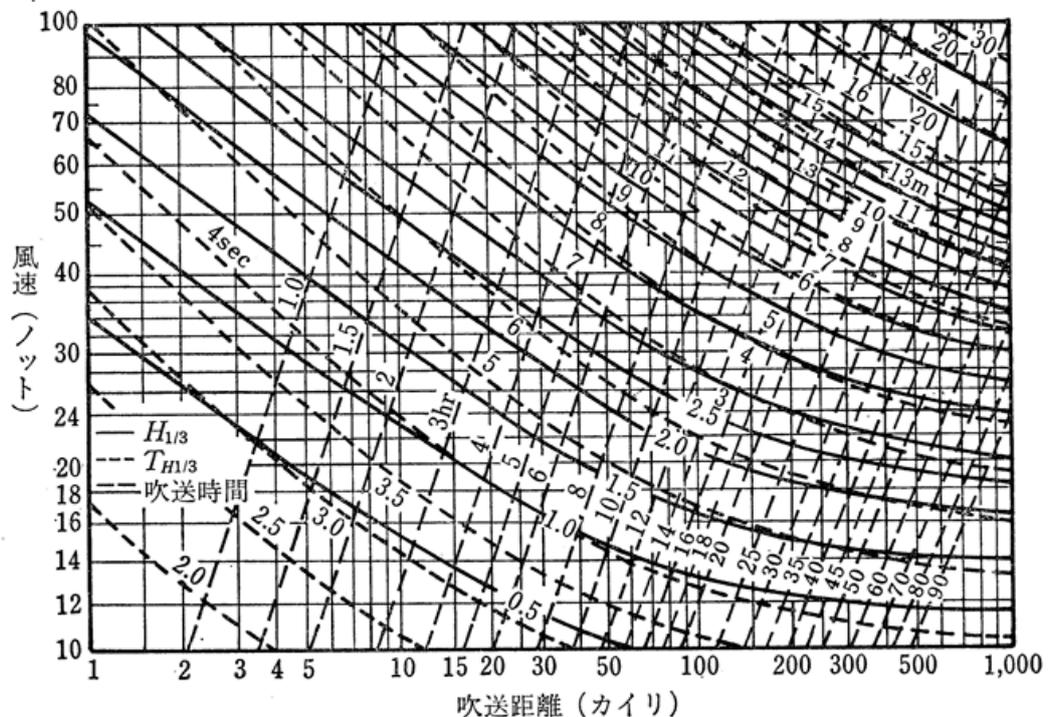


図 3.2.13 波浪推算図表

（出典：山内（1986））

#### ② スペクトル法

スペクトル法は有義波法に対し、より厳密に複雑な波浪状況を取り扱うため、波の周波数と方向別のエネルギーである波浪スペクトルに着目した手法である。Pierson, Neumann and James（1953）が提唱した波浪推算手法（PNJ法）は有義波法に比べ計算の手続きが煩雑であったため、当時は普及することはなかったが、計算技術の発達した現代において普及している数値波浪予測モデルは専らスペクトル法を基礎とする。

現時点（2017年）で数値波浪予測モデルの中で最も普及しているモデルが世界各国の波浪を研究している研究者を集めて結成した WAMDI グループによって開発された WAM モデル（1988）である。このモデルはヨーロッパ中期予報センター（ECMWF:

### 第3章 自然環境条件

European Centre for Medium-range Weather Forecasts) をはじめ世界各国の波浪予測を行う機関でも取り入れられ、アメリカ海洋大気庁 (NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration, U.S. Department of Commerce) の Wave WatchIII や気象庁の MRIIII も WAM に基づいて開発されている。

WAM の基本式は Hasselman による波のエネルギー収支を示す以下のような式 (3.2.18) で表される。

$$\frac{\partial S(f, \theta, t, X)}{\partial t} = -c_g \nabla S(f, \theta, t, X) + E_{in} + E_{nl} + E_{ds} \quad (3.2.18)$$

$S(f, \theta, t, X)$  は時間  $t$  において位置  $X$  に存在する平面 2 次元波浪場のスペクトル  $S(f, \theta)$  (成分波エネルギー密度) であり  $c_g$  は成分波の群速度である。式 (3.2.18) の右辺第 1 項は成分波エネルギー密度の移流項であり、第 2~4 項はエネルギーソース関数とよばれ、具体的には風から波へのエネルギー輸送量 ( $E_{in}$ )、成分波間の非線形相互作用によるエネルギー輸送 ( $E_{nl}$ )、砕波や海底摩擦などによるエネルギー消散 ( $E_{ds}$ ) 等を示す。このモデルは日々改良され、現時点では観測値を用いて推算精度を向上させるデータ同化が可能な WAM Cycle5 にまで改定されており、図 3.2.14 のように高い精度で有義波高を推定できていることがわかる。

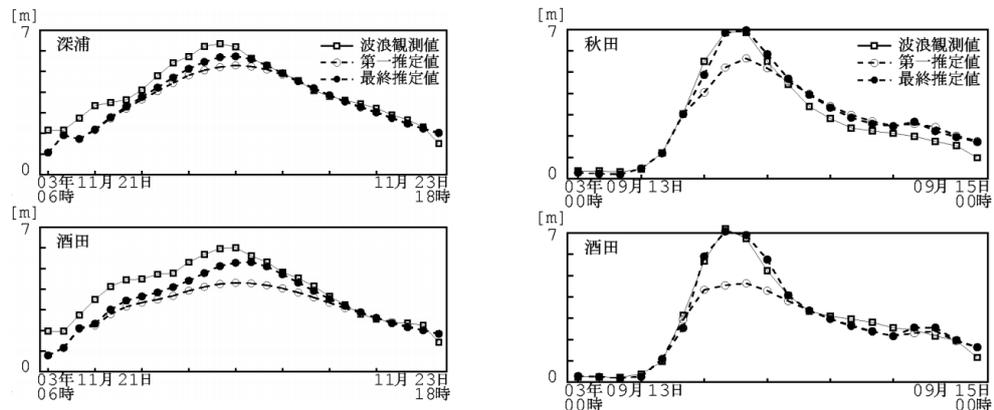


図 3.2.14 WAM cycle5 モデルを用いた有義波高の推算例

(出典: 橋本ら (2006) )

WAM モデルが比較的広い海での波浪推算を得意とするのに対し、狭い湾内などでの波浪推算が得意な SWAN (Simulating Wave Nearshore) モデルも小領域の波浪推算モデルとして有名である。図 3.2.15 では閉鎖性湾である大阪湾と広島湾においても高い精度で有義波高を推算できていることが分かる。

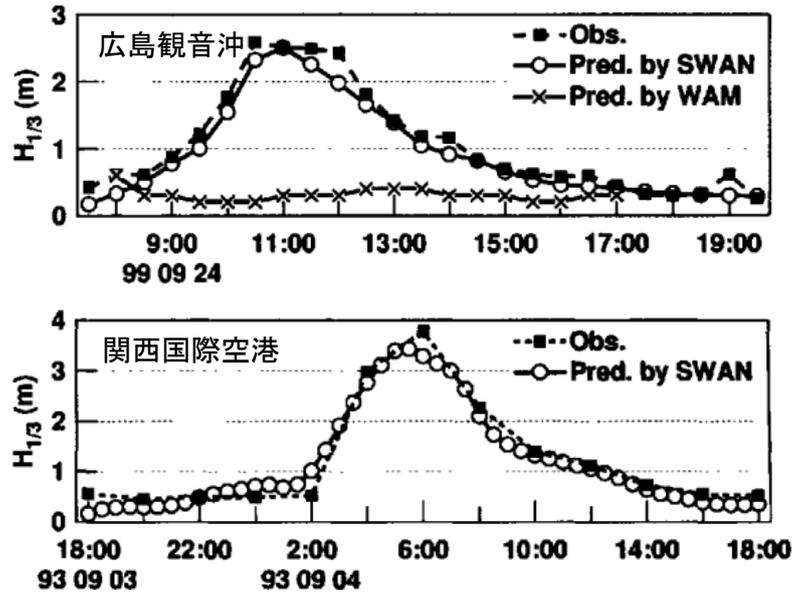


図 3.2.15 SWAN による有義波高の推算例

(出典：間瀬ら (2001) )

WAM を基にした NOAA の WaveWatchIII や SWAN モデルのソースコードはそれぞれ以下の URL で公開されている。

WaveWatchIII : <https://polar.ncep.noaa.gov/waves/wavewatch/>

SWAN : <https://www.tudelft.nl/en/ceg/about-the-faculty/departments/hydraulic-engineering/sections/environmental-fluid-mechanics/research/swan/>

気象庁では、極域を除くほぼ地球全体を対象とする「全球波浪モデル」と日本周辺を対象とする「沿岸波浪モデル」を運用しており、一部の内海、内湾に対しては「浅海波浪モデル」を試験運用している。それぞれのモデルの概要を表 3.2.2 に示す。外力として重要な海上風は気象予測モデルから得られる風応力を用いており、全球波浪モデル・沿岸波浪モデルには全球数値予測モデル (GSM) を用いている。また、浅海波モデルに関しては GSM より細かい格子間隔で局地的な予測を行うメソ数値予測モデル (MSM) を用いており、沿岸波浪モデルの波の境界条件は全球波浪モデルから与えられる。

第3章 自然環境条件

表 3.2.2 気象庁で運用している波浪モデル

	全球波浪モデル	沿岸波浪モデル
タイプ	MRI-III (第3世代波浪モデル)	
計算領域	地球のほぼ全海域 75° S~75° N 180° W~0° ~180° E (全周)	日本近海・沿岸 20° N~50° N 120° E~150° E
格子数	720×301	601×601
格子間隔	緯経度0.5度	緯経度0.05度
スペクトル成分	900成分 (25周波数×36方位) 周波数成分：0.0375~0.3Hz；対数分割 方位成分：10度間隔	
外力	全球モデルGSM (20km格子) 台風域内は仮想的な傾度風で補正 (72時間先まで)	
予測時間 (12UTC) (00/06/18UTC)	216時間 84時間	84時間 84時間

浅海波浪モデル						
タイプ	WAMベース (第3世代波浪モデル)					
計算領域	東京湾 35.05° N~ 35.75° N 139.55° E~ 140.15° E	伊勢湾 34.35° N~ 35.05° N 136.45° E~ 137.45° E	播磨灘・大阪湾 34.05° N~ 34.85° N 134.15° E~ 135.45° E	有明海 32.45° N~ 33.25° N 130.05° E~ 130.75° E	仙台湾 37.75° N~ 38.45° N 140.90° E~ 141.50° E	新潟沖 37.80° N~ 38.40° N 138.35° E~ 139.25° E
格子数	37×43	61×43	79×49	43×49	37×43	55×37
格子間隔	緯経度1分					
スペクトル成分	1260成分 (35周波数×36方位) 周波数成分：0.0418~1.1Hz；対数分割 方位成分：10度間隔					
外力	メソ気象モデルMSM (5km格子) 台風域内は仮想的な傾度風で補正					
予測時間 (03/09/15/21UTC)	33時間					

(出典：竹内ら (2012) )

3.2.2 風

風は大気の運動であり気圧勾配や地球の自転によるコリオリ力 (Coriolis force)、地球表面との摩擦力、曲線運動による求心力等によって式 (3.2.19) のような形で支配されている。

$$\frac{dV}{dt} = \underbrace{\alpha \nabla p}_{\text{気圧傾度力}} - \underbrace{2\Omega \times V}_{\text{コリオリ力}} + \underbrace{g}_{\text{重力}} - \underbrace{\Omega \times (\Omega \times r)}_{\text{求心力}} + \underbrace{F}_{\text{摩擦力}} \quad (3.2.19)$$

### 第3章 自然環境条件

ここで  $\mathbf{V}$ : 大気の地球に対する相対速度ベクトル、 $\alpha$ : 比容積 $=1/\rho$ 、 $\rho$ : 大気密度、 $p$ : 大気圧、 $\boldsymbol{\Omega}$ : 地球の自転角速度ベクトル、 $\mathbf{g}$ : 地球の重力ベクトル、 $\mathbf{r}$ : 地球の中心からの位置ベクトル、 $\mathbf{F}$ : 摩擦力ベクトルである。

地表もしくは海面上高度 1km 以上では一般に摩擦力はコリオリ力等に比べその影響を無視でき、このような層を自由大気 (free atmosphere) と呼ぶ。逆に高度数十 m においては摩擦力が大きくコリオリの力等は通常考えない。このような層を接地境界層 (surface boundary layer) と呼ぶ。接地境界層と自由大気の間をエクマン層 (Ekman layer) と呼びコリオリ力と摩擦力を両方考える必要がある。また接地境界層とエクマン層を併せて大気境界層 (atmosphere boundary layer) と呼び、大気層の構成は図 3.2.16 のような模式図で示される。洋上風車を含む海洋構造物の高さは高々 200m 程度 (2017 年) であるため、ここでは基本的には大気境界層内での事象を取り上げることとする。以下においては風の基本的な性質から観測手法、予測モデルについて述べる。

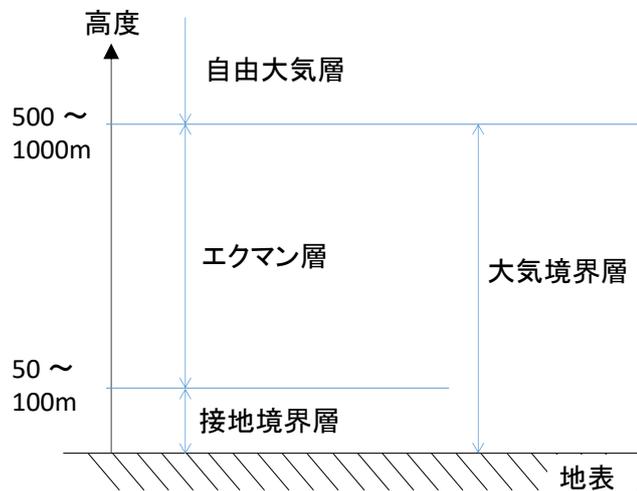


図 3.2.16 大気層の模式図

#### (1) 定常風

地表や水面の摩擦を受けない上層の風は主に以下の地衡風 (geostrophic wind)、傾度風 (gradient wind)、旋衡風 (cyclotrophic wind) に分けられ、比較的高度が低く海面の影響を受ける風は海上風 (sea surface wind) と呼ばれる。図 3.2.17 に北半球におけるそれぞれ風の釣り合い状態の模式図を示す。ここでコリオリ力は地球が東向きに自転しているため北半球では進行方向に対して右向きに、南半球では左向きに力が作用する。

地衡風：コリオリ力と気圧傾度力が釣り合った状態で等圧線にはほぼ平行で定常的に吹く風。

傾度風：等圧線が曲がっている場合には、コリオリ力、気圧傾度力に加えて空気が円

### 第3章 自然環境条件

運動を行うための求心力(=遠心力)の3つの力が釣り合った状態で吹く風。風向は等圧線に平行で、北半球では高圧側から低圧側に向かって右手直角方向に吹く。

旋衡風：台風を中心付近や竜巻の域内で発生し、等圧線の曲率半径が非常に小さく、気圧傾度が大きい場合に生じる風。この場合、コリオリ力は遠心力や気圧傾度力に比べ小さいため無視でき、遠心力と気圧傾度力との釣り合いとして風速を求めることができる。

海上風：海上風は上記の3つの風の状態に加え海水温・気温差と温度場の状態とで定まる温度傾度と、海面との摩擦力の影響を受ける。

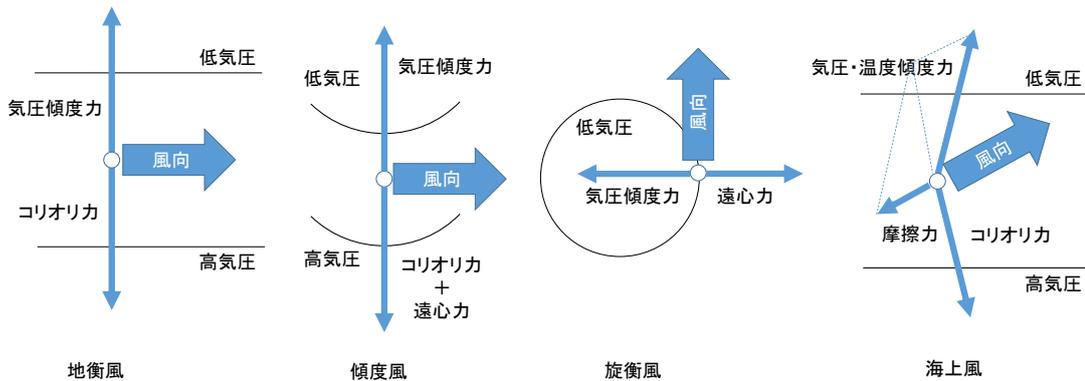


図 3.2.17 大気の釣り合い模式図 (北半球)

(出典：山内 (1986))

また地表・海面との摩擦の影響を受ける風速鉛直分布に関しては、粘性流体の境界層理論に類似しているものとして式 (3.2.20) のような対数法則 (logarithmic law) もしくは、べき法則 (power law) に従うものとして表される。一般に対数法則は高度が高くなると適合性があまり良くないため、構造物の耐風設計においては、べき法則が広く利用されている。ここでべき法則の  $\alpha$  は粗度が大きいほど大きくなり図 3.2.18 のように境界層が厚くなる。地表に比べ比較的滑らかな海上では  $\alpha = 1/6 \sim 1/7$  程度の値が用いられる。基準高度  $Z_0$  は通常は地上気象観測法で規定される地上 10m の風速  $V_{10}$  が採用されるが、波浪予測に用いられる海上風については、北大西洋の海洋気象観測船の風速計高度 19.5m における風速  $V_{19.5}$  を基準とすることが多い。

$$V_z = \frac{V_*}{k} \ln \frac{z}{z'} : \text{対数法則} \quad (3.2.20)$$

$$V_z = V_0 \left( \frac{z}{z_0} \right)^\alpha : \text{べき法則}$$

ここで、 $V_z$  : 高度  $Z$  における平均風速、 $V_*$  : 摩擦速度  $= \sqrt{\tau_0/\rho}$ 、 $\tau_0$  : 表面でのせん断

### 第3章 自然環境条件

応力、 $k$ ：カルマン定数(約 0.4)、 $V_0$ ：基準高度 $Z_0$ における基準風速、 $\alpha$ ：表面粗度に関する定数である。

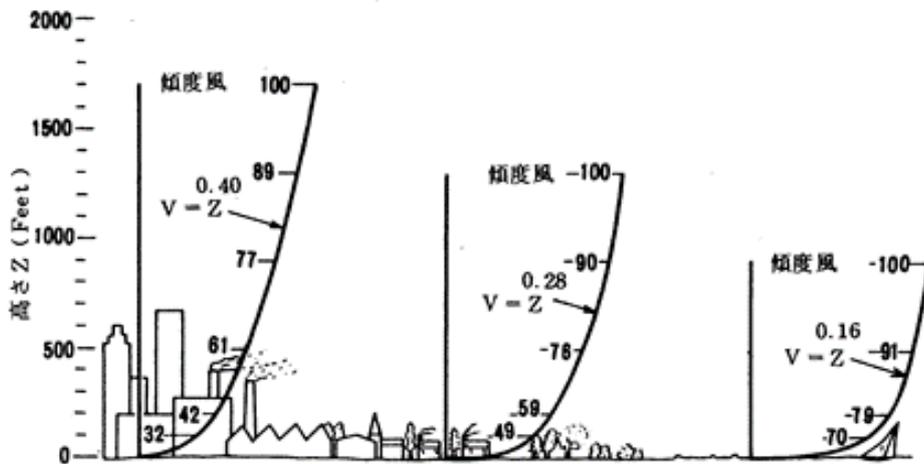


図 3.2.18 粗度とべき指数と境界層厚さの関係

(出典：国際海洋科学技術協会 (1988) )

#### (2) 変動風

大気境界層内の風の流れは乱流 (turbulent flow) と考えることができ、時空間的に絶えず変動しているため、その運動を単純な運動方程式で記述することは難しく、現状では統計学的に取り扱う必要がある。構造物の耐風設計においては平均風速よりも最大瞬間風速が重要である。平均風速に対する最大瞬間風速の比は突風率 (ガストファクター、gust factor) といわれている。ガストファクター $G$ の推算式 (3.2.21) として多くの研究者による提案式があるが、光田の観測結果 (図 3.2.19) とそれに基づく石崎の推算式を以下に示す。洋上のような開けた場所の場合は  $G=1.5\sim 2.0$  付近の値をとることが多い。

$$G(l, s) = [s/s_0 + (l/l_0)^{1.2}]^{-0.12} \quad (3.2.21)$$

ここで、 $l$ ：評価距離、 $S$ ：評価時間、 $l_0$ ：基準評価距離 (=2160m)、 $S_0$ ：基準評価時間 (=900sec) である。

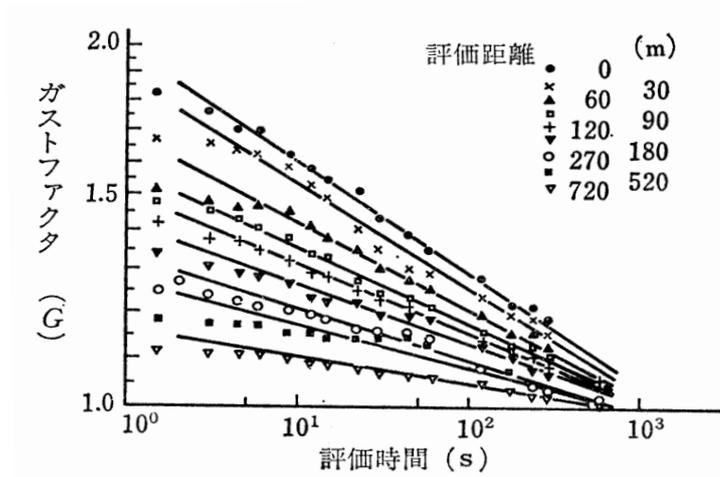


図 3.2.19 ガストファクターと評価時間、評価距離の関係

(出典：光田 (1976) )

ある観測点において時間的に変化する変動風は、不規則波と同様にその風速変動を周波数ベースのスペクトルとして表現することができる。図 3.2.20 に長期間風速を計測した場合の風速のスペクトルを示す。ここで横軸は周波数、縦軸はエネルギーである。図 3.2.20 のスペクトルには幾つかの山が見られるが 3~4 日周期にピークがあるのは高低気圧が大体 3~4 日で入れ替わるためである。次の半日周期のピークは日射による寒暖の差によって生じる海陸風等で、2 分程度の短い周期のものは表面粗度によって生じる乱れによるピークである。一方、周期が 10 分~1 時間の辺りに変動の少ない安定した区間があり、一般的に風速として日本では 10 分間、イギリス、カナダでは 1 時間平均、アメリカでは 5 分間の平均した風速を用いている。

表面粗度による乱れにおいては、様々なスペクトル表示式が提案されており、最も有名なものが式 (3.2.22) に示す Davenport のものである。

$$\frac{fS(f)}{KU_{10}^2} = \frac{4x_D^2}{(1+x_D^2)^{4/3}} \quad (3.2.22)$$

ここで  $S(f)$  : パワースペクトラム、 $f$ : 周波数、 $U_{10}$ : 高さ 10m での風速、 $K$ : 表面摩擦係数 (開けた海面で 0.001~0.003)、 $L=1200\text{m}$ 、 $x_D=fL/U_{10}$ 、であり、図 3.2.21 は海洋気象調査船 POSEIDON 号観測データ (水面上 19.5m で計測) と様々なスペクトル表示式のパワースペクトルを比較したものであるが、周波数が小さい領域での一致が悪く、必ずしも Davenport スペクトルが良いとも限らない。

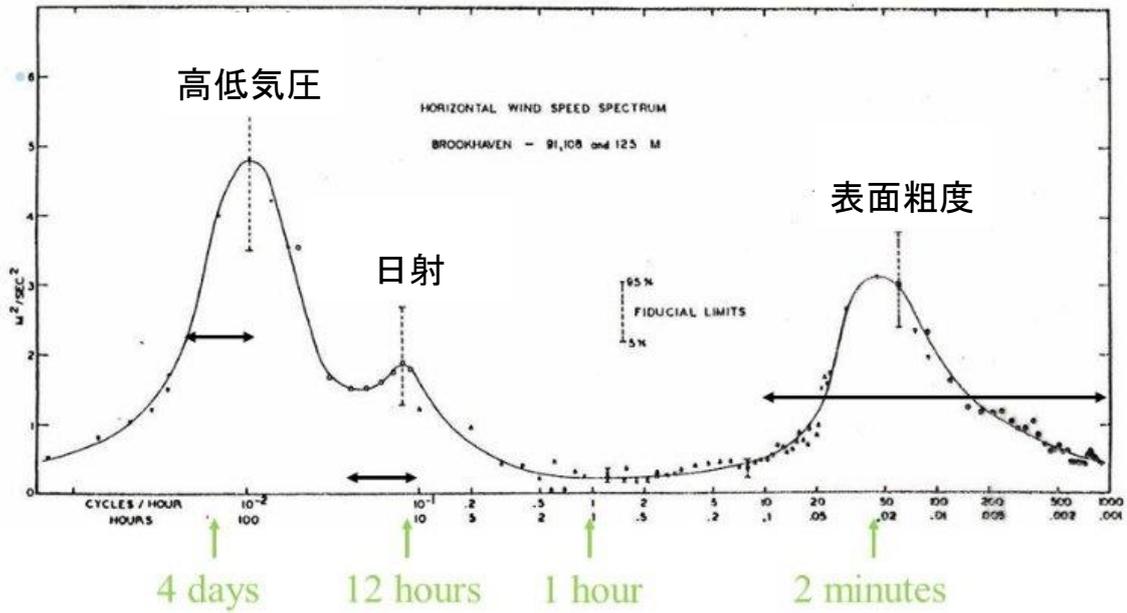


図 3.2.20 変動風の長周期スペクトル

(出典：Van der Hoven. (1957) に著者注記)

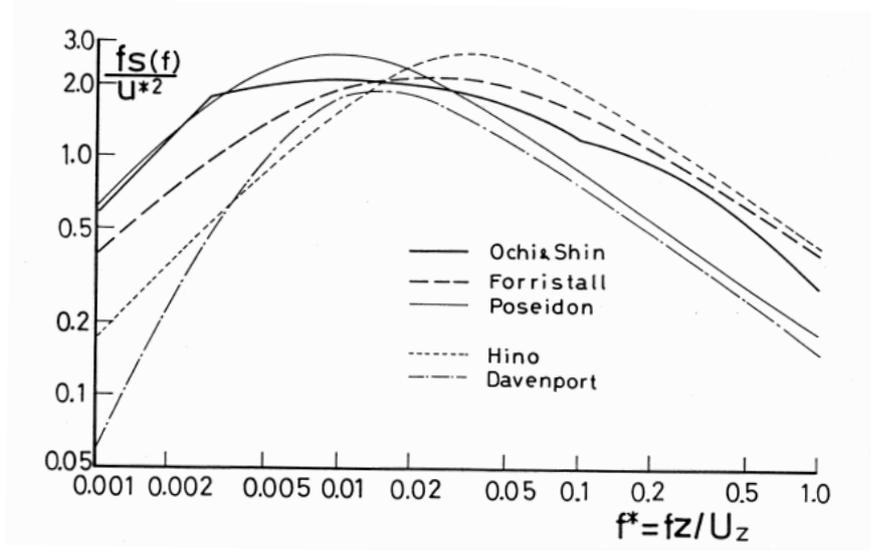


図 3.2.21 風のパワースペクトル表示式の比較

(出典：日本造船学会 (1992) )

(3) 風の数値シミュレーションモデル

大気と海洋の3次元的な運動や熱力学を物理則に則って計算する気候モデルは大気循環モデル (GCM : General Circulation Model) と呼ばれ、計算機技術が発達し始めた1960年代から様々なモデルが提案されている。特に大気の運動に特化したものを大気モデル (AGCM : Atmospheric Global Climate Model) と呼ぶ。以下ではそれらの大気モ

### 第3章 自然環境条件

デルに共通する事柄について述べる。

流体の動きは基本的に以下の3つの法則によって支配されている。

- ・運動量保存則
- ・エネルギー保存則
- ・質量保存則

ここから大気の運動に関してプリミティブ方程式系と呼ばれる基本方程式が導かれ、ラグランジュ形式で単純化したプリミティブ方程式系は式(3.2.23)のようになる。基本方程式は式(3.2.23)の上から順に、大気が生成消滅しないことを表す連続の式、大気の運動量の時間発展を表す運動方程式、気温の時間発展を表す熱力学の式(熱力学第一法則)、気圧、気温、大気密度の関係を表す状態方程式(ボイルの法則)、さらに水蒸気の生成消滅による水蒸気量の変化を表す水蒸気の輸送方程式である。

$$\text{連続の式:} \quad \frac{d\rho_a}{dt} + \rho_a \nabla v = 0$$

$$\text{運動方程式:} \quad \rho_a \frac{dv}{dt} + \nabla p + \rho_a \nabla \Phi = F$$

$$\text{熱力学の式:} \quad \frac{dT}{dt} = \frac{1}{C_p} \frac{dp}{dt} + \frac{Q}{C_p} \quad (3.2.23)$$

$$\text{気体の状態方程式:} \quad p = \rho_a RT$$

$$\text{水蒸気の輸送方程式:} \quad \frac{dq}{dt} = S_q$$

ここで  $p$ : 圧力、 $\rho_a$ : 大気密度、 $R$ : 気圧定数、 $T$ : 気温、 $v$ : 風速、 $q$ : 比湿 = 水蒸気密度/大気密度、 $S_q$ : 比湿の単位時間単位体積あたりの生成消滅量、 $\Phi$ : 重力ポテンシャル、 $F$ : 粘性力+外力、 $C_p$ : 乾燥大気の定圧比熱、 $Q$ : 外部との摩擦による熱量である。

大気モデルでも波浪の場合と同様に通常は全球モデルからメソスケールモデルに、また、メソスケールモデルから局所モデルに境界条件を与える。図3.2.22に気象庁の水平格子間隔5km間隔のメソスケールモデルと2km間隔の局地モデルを用いた2011年の台風15号上陸時の降水量予測を示す。図3.2.22からメソスケールモデルよりも解像度の高い局所モデルの方が降水量を比較的精度良く推定できていることがわかる。また世界的に広く使われているメソスケールモデルとしてはThe PSU/NCAR mesoscale model (MM5)が挙げられる。また近年ではアメリカの国立大気研究センター (NCAR) と国立環境予測センター (NCEP) が中心となって開発した Weather Research Forecasting Model (WRF)が使用され始めている。MM5、WRFはいずれもソースコードが公開されており、以下URLからダウンロードすることができる。

MM5 : <http://www2.mmm.ucar.edu/mm5/>

WRF : <https://www.mmm.ucar.edu/weather-research-and-forecasting-model>

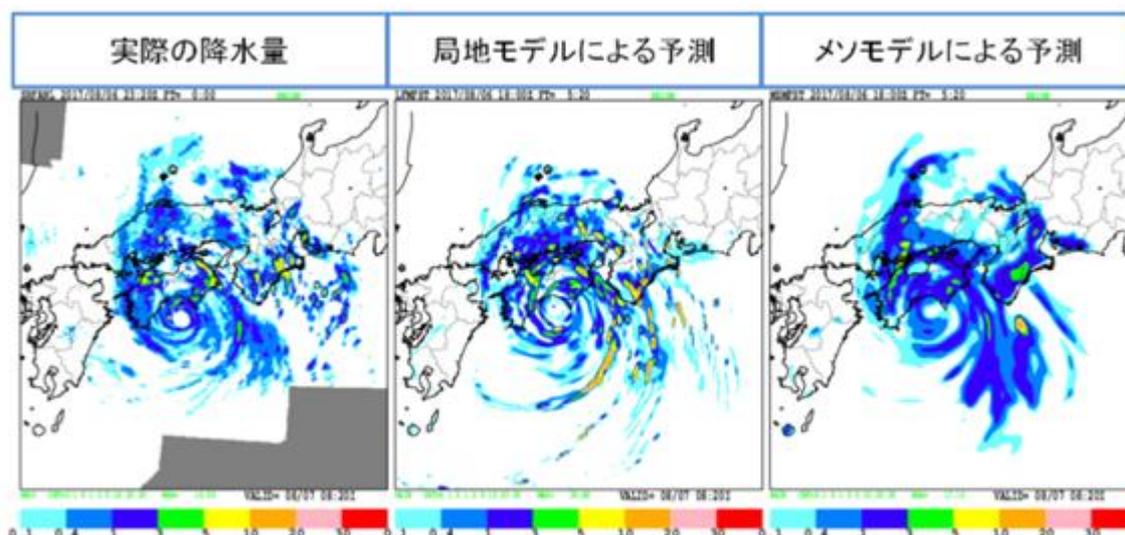


図 3.2.22 局所モデルとメソスケールモデルによる 2017 年台風 15 号の降雨量予測

(出典：気象庁ウェブサイト)

### 3.2.3 潮流・海流

海洋構造物に作用する主要な自然外力として潮流・海流による流体力が挙げられる。海面下に大きな構造を持つものは影響を受けやすく、特にライザー管やドリルパイプにとっては強度設計上重要な自然外力となる。

#### (1) 潮流

潮流は潮汐によって生じる流れである。潮汐は天体による重力場の変化によって引き起こされる潮汐力によって生じる。地球の場合は自転に従い約半日周期で変動する。海水面が最も高くなる時を高潮・満潮 (high tide)、最も低くなる時を低潮・干潮 (low tide) とよぶ。また新月・満月の時は月・太陽・地球が一直線上に並び、海面の高低差が大きくなる大潮 (spring tide) と呼ばれ、月・太陽・地球が直角に並び潮汐力が打ち消し合う上弦・下弦の時は高低差が小さくなる小潮 (neap tide) と呼ばれる。干潮から満潮の間を上げ潮 (flood tide)、満潮から干潮の間を下げ潮 (ebb tide) と呼び、上げ潮と下げ潮で流れの向き (流向) もほぼ 180 度変化する。ここで流向の定義は通常、風向・波向の定義とは逆で、流れ去る方向であることに留意する。0 時に満潮がある場合の水位変動と流速の関係を図 3.2.23 に示す。

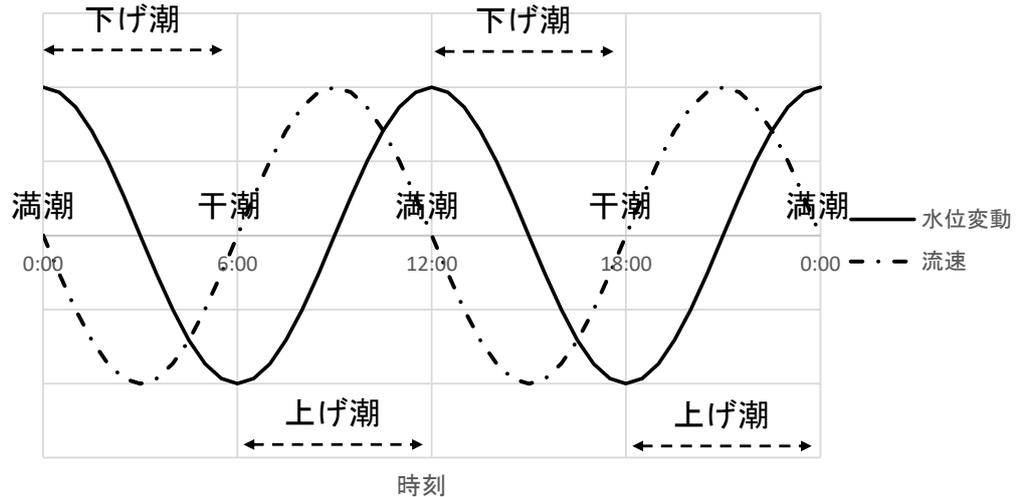


図 3.2.23 潮汐による水位変動と流速の関係図 (0 時満潮の場合)

潮汐は地形の影響を強く受ける。例えば湾口の小さい湾では湾へ出入りする流路が制限されていることから湾口と湾奥での水位変動に時間差が生まれる。この時間遅れの周期(湾の固有周期)と潮汐の半日周期が近いと共振現象を起こし、湾奥での潮位が大きくなることがある。共振を起こす代表的な湾がカナダにあるファンディ湾である。ここでは湾口で 2.8m 程度の潮位が湾奥で約 15m にもなることが知られている。

また潮流流速を一周期分積分すると積分値はゼロとなるが、実際には海水の移動に関する運動方程式と連続の式を用いて変動周期成分の 2 次のオーダーとして流れが残ることが示されている。これを潮汐残差流 (tidal residual current) とよび、構造物の外力としては無視できるが、長時間の拡散現象等を取り扱う場合には重要な要素となりえる。

## (2) 海流

海流は潮流と異なりほぼ一定方向に非常に長い時間水平方向に流れ続けることが特徴である。海流が発生する主な原因として挙げられるのが偏西風や貿易風のように恒常的に吹く卓越風と海面の摩擦に起因する風成循環 (wind-driven circulation) による表層循環と、海水温と塩分濃度の不均一に起因する熱塩循環 (thermohaline circulation) による深層循環である。この深層循環は非常にゆっくりとした流れである。南極大陸沿岸で沈降した深層水は 1000 年後に赤道付近、約 1600 年後にアリューシャン列島付近に到達すると考えられており、ほとんど認知できない。よって海洋構造物にとって重要になるのが表層循環である。

表層循環は低緯度から高緯度へ向けて流れる海流を暖流 (warm current) と、高緯度から低緯度に流れる海流を寒流 (cold current) に大別できる。図 3.2.24 に世界の主な海流分布を示す。図 3.2.24 において○で囲われた数字の海流が暖流で□で囲われたものが寒流である。中でも黒潮とメキシコ湾流 (Gulf stream) の表層循環は流量・流速ともに世界最大規模の海流であり、メキシコ湾流の幅は約 100km、厚さは約 0.8~1.2km、流速は速い

### 第3章 自然環境条件

ところで 5kt (2.5m/s) に近い。

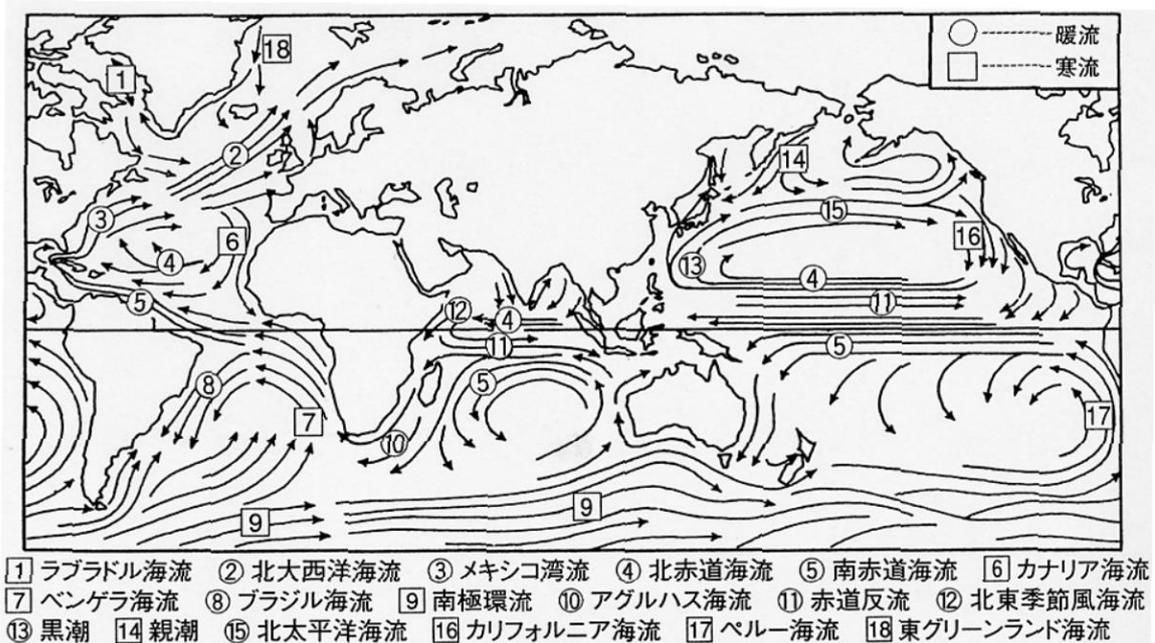


図 3.2.24 主な世界の海流分布

(出典：酒井 (2003) )

一方、先に示した地球規模の循環（表層循環と深層循環）ではなく、局所的な風によって引き起こされる流れは吹送流（wind-driven current）と呼ばれ、海面から水深約 400m までの海水の流れをいう。

この吹送流の方向は風の吹く方向とズレがあることが知られており、それを理論的に示したのが **V.W. Ekman** (1905) である。水深方向のせん断応力とコリオリの力の作用の下、流速が図 3.2.25 に示すように、水深の増加に伴い方向を変えながら螺旋状に減少していくことを示した。これをエクマン螺旋と呼ぶ。

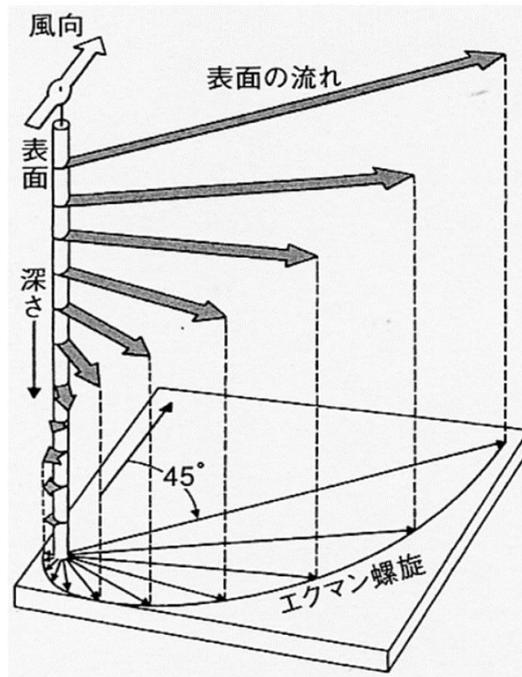


図 3.2.25 エクマン螺旋

(出典：酒井 (2003) )

$z$  軸を水面から下向き、 $y$  軸を風の吹いた方向、 $x$  軸を  $y$  軸に水平面内で直交する方向にとると、 $x$  方向の流速  $u$  と  $y$  方向の流速  $v$  は式 (3.2.24) のように示される。

$$\begin{cases} u = V_0 \exp\left(-\frac{\pi}{D}z\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{D}z + \frac{\pi}{4}\right) \\ v = V_0 \exp\left(-\frac{\pi}{D}z\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{D}z + \frac{\pi}{4}\right) \end{cases} \quad (3.2.24)$$

$$V_0 = \frac{\tau}{\rho\sqrt{A_v f}}, D = \frac{\tau}{\sqrt{f/2A_v}}$$

なお、 $\rho$  : 海水密度、 $A_v$  : 鉛直渦動粘性係数、 $f$  : コリオリ係数、 $D$  : 摩擦係数、 $\tau (= \rho_a C U^2)$  : 風の摩擦応力、 $\rho_a$  : 大気密度、 $U$  : 風速、 $C$  : 抗力係数である。また、抗力係数については

$$C \times 10^3 = \begin{cases} 1.29 - 0.024U : U \leq 8 \text{ m/s} \\ 0.581 + 0.063U : U > 8 \text{ m/s} \end{cases}$$

を用いることが多い。

ここで、 $z=0$  とすると  $u=v$  となり、吹送流が風の向きと 45 度ずれることが分かる。また  $z=D$  となると流向が表層流と 180 度逆を向き、速度も 1/23 になる。

### (3) 海流・潮流の数値シミュレーション

海流・潮流の数値シミュレーションも、特に海洋の流れに特化したものを海洋モデル (OGCM : Oceanic Global Climate Model) と呼び、大気モデルとは大気密度を海水密度に入れ替えたものとはほぼ同じ支配方程式を用いるが、水蒸気の輸送方程式の代わりに塩分

### 第3章 自然環境条件

の輸送方程式が用いられるのが特徴である。また海洋モデルの特徴として非圧縮性流体を仮定し、流体密度に対する密度変化が小さい場合は流体の密度変化によって生じる運動量変化は無視でき浮力としてのみ流体運動に寄与するという近似（ブジネスク近似）や水平スケールが鉛直スケールより十分大きい場合、重力と傾度力が釣り合っていると近似（静水圧近似）が用いられることが多い。また海洋モデルには代表的な座標系が3つあり、それぞれの特徴と代表的なモデルを表3.2.3に示す。

表 3.2.3 海洋モデルの代表的な座標系

座標系	特徴	代表的なモデル
z座標系 (気候モデル)	重力に垂直な面を鉛直座標とする。 計算変数の保存性に優れ、長期間計算に適する。	MOM MITgcm MRI.COM
$\sigma$ 座標系 (気候モデル)	海底面に沿った面を鉛直座標とする。 浅海部と深海部で計算する鉛直層数が同一のため水深が場所によって大きく変化する沿岸域での計算に適する。ただし長期間の計算には適さない。	POM ROMS
等密度座標系 (気候モデル)	等密度面に沿った面を鉛直座標とする。 等密度面に沿った運動が卓越する外洋の計算に適する。	HYCOM NLOM

図3.2.26にz座標系と $\sigma$ 座標系の例を示す。またz座標系の代表的な全球モデルの一つであるMITgcmによる精細な日本近海の表層流の計算例を図3.2.27に示す。MITgcmはデータ同化に対応しており比較的正確な予測を行うとされている。MITgcmや $\sigma$ 座標系モデルの代表的なモデルであるPOMもまたオープンソースであり以下URLからダウンロードできる。

MITgcm : <http://mitgcm.org/about-mitgcm/>

POM : <http://www.ccpo.odu.edu/POMWEB/>

### 第3章 自然環境条件

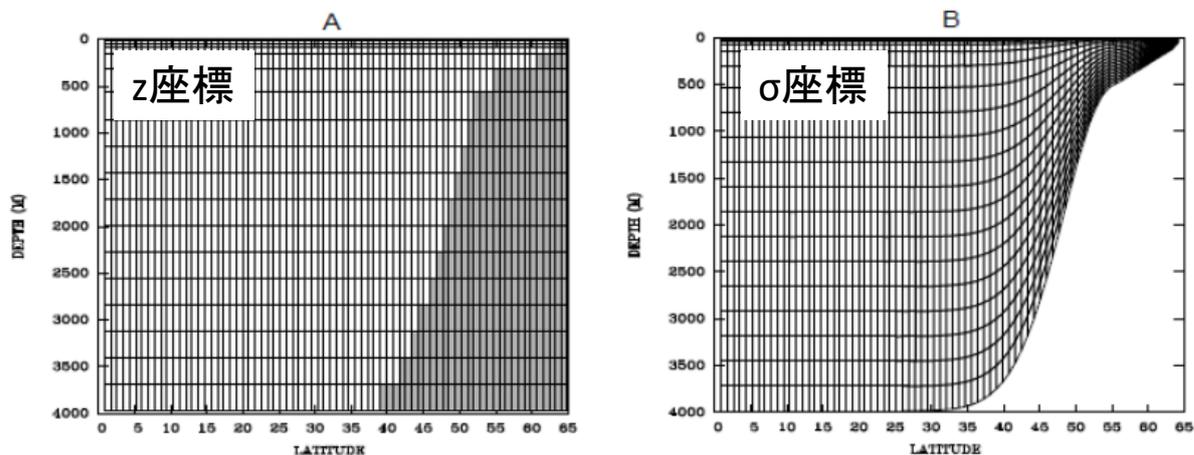


図 3.2.26 z 座標系と  $\sigma$  座標系による水深方向の計算格子

(出典 : Mellor et al. (2002) )

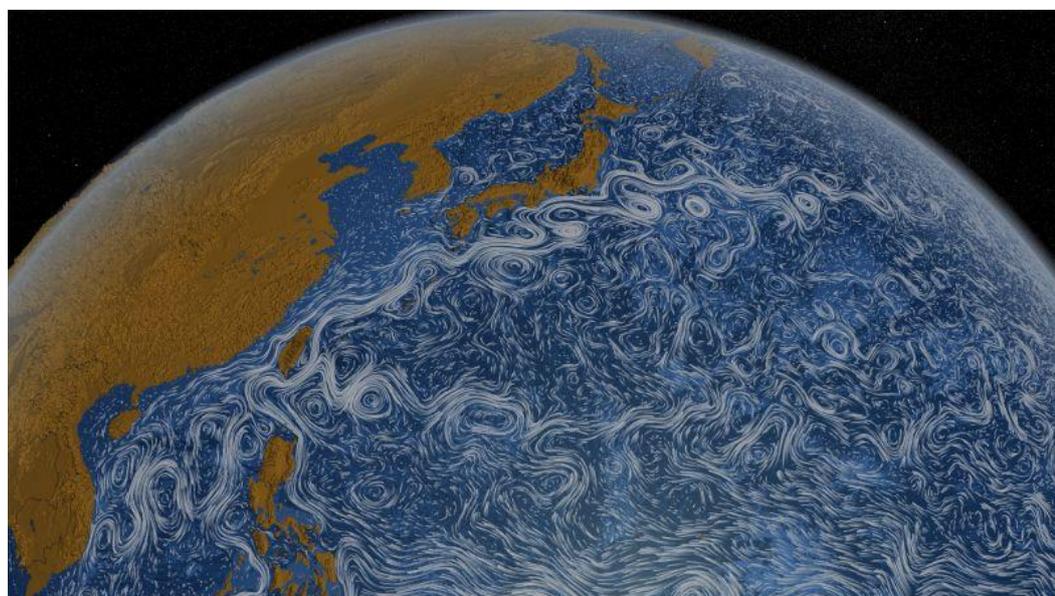


図 3.2.27 MITgcm によってシミュレートされた日本近海の表層流

(出典 : NASA ウェブサイト)

日本近海のモデルとしては 1997 年に始まった日本沿海予測可能性実験 (JCOPE) の下で開発された海中天気予報システムがあり、水温、塩分海洋観測データと、衛星の海面水温や高度データをもとに定期的に予測を行っている。海洋研究開発機構 (JAMSTEC) によって改良された JCOPE2 (Miyazawa et al., 2009) が現在運用されている。このモデルは  $\sigma$  座標系モデルにおいて世界的によく用いられている POM を基に開発されており、図 3.2.28 のように日本近海をカバーする、1/12 度(10km 弱)の高解像度の格子モデルを、北太平洋全体をカバーする比較的粗い格子モデルの中に埋め込んで計算している。

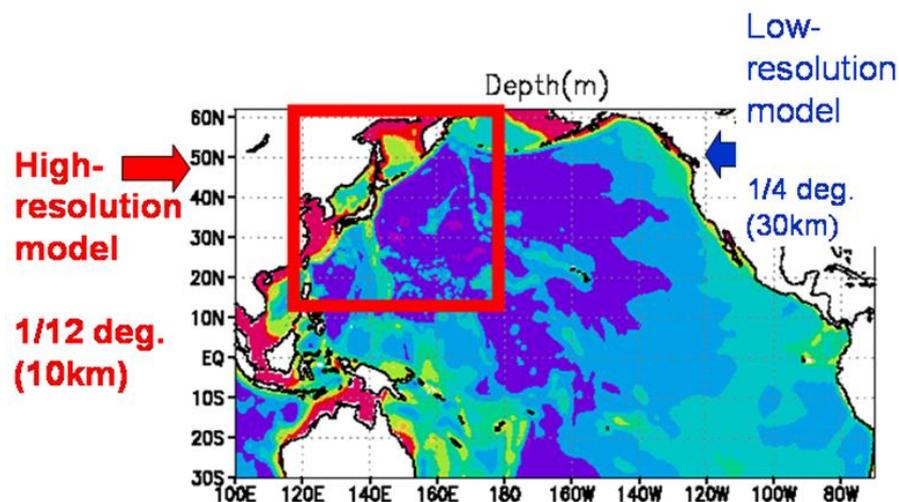


図 3.2.28 JCOPE2 の低解像度範囲と高解像度範囲

(出典：JAMSTEC ウェブサイト)

### 3.2.4 その他

#### (1) 海氷・氷山

米国地質調査所 (USGS: U.S. Geological Survey) が 2008 年 7 月に公表した資料「環北極圏資源評価 (CARA: Circum-Arctic Resource Appraisal)」によれば世界の未発見資源量の 13% (石油)、30% (天然ガス) が北極海に眠っているとされている。また近年の北極海の海氷面積は急激に減少しており (Ikeda et al., (2003))、図 3.2.29 のような、厳しい環境である北極海での資源開発プロジェクトが活発化している。



図 3.2.29 北極海で操業するオイルリグ

(出典：Gazprom ウェブサイト)



図 3.2.30 アイスガウジング

(出典：Mike Paulin et al (2016) )

海氷が減ったとはいえ海洋構造物にとって問題となるのが氷である。巨大な質量を持つ海氷・氷山による構造物の破壊や、アイスガウジング (ice gouging：氷山等による海底洗掘 (図 3.2.30 参照)) による海底パイプラインの切断の可能性もある。以降では主に北極海における海氷・氷山について述べる。

#### ① 氷の種類

氷には様々な種類があり、以下に海洋構造物に関係の深い氷の種類について述べる。水に浮いている氷の総称を浮氷と呼び、その中でも海水が凍結したものが海氷 (sea ice) である。また岸に接岸している海氷を定着氷と呼び、海氷域に見られる定着氷以外の全ての氷の総称は流氷 (drift ice/pack ice) と呼ばれる。また 1 年以上経過していない海氷を一年氷 (first-year ice) と呼び、ひと夏だけ融けずに残った海氷を二年氷、ふた夏以上融けずに残ったものを多年氷 (multi-year ice) と呼ぶ。

高所から低い方へと動いている雪と氷の塊を氷河 (glacier) といい、氷河から海に押し出されているものを棚氷 (ice sheet)、棚氷から分離した海面上 5m 以上の氷塊を氷山 (iceberg) という。タイタニック号の沈没原因として有名な氷山であるが、実は氷山が見られる海域は限られており、南半球では南氷洋、北半球では北大西洋高緯度でしかみられず、太平洋やベーリング海では見られない。

#### ② 海氷・氷山の動力源

海氷や氷山が動き回るためには外部からエネルギーを受ける必要があるが、その主要な動力源は海流や風だけでなく、海氷自体の熱膨張や他の海氷からの荷重の 4 つの要因がある (図 3.2.31)。また氷山は水面下の体積が非常に大きいため海流の 1.5~2 倍のスピードで動くことが知られている (El Tahan et al. (1983))。図 3.2.32 に北極海の表層の海流を示す。北極海の表層海流にはアラスカ北岸と北極点との中間辺りを中心とす

### 第3章 自然環境条件

る時計回りの還流があり、海氷もこの還流に乗って漂流する。また海上風による海氷の移動速度は海上風速の5%程度になるとされる。海氷の熱膨張による力には2種類あり、図3.2.33 (a)のように池や湖などの閉鎖水域に一面氷が貼った場合、氷が膨張できず、氷に圧縮応力がかかる。一方、海洋構造物にとって専ら脅威となるのは図3.2.33 (b)のような場合であり、海氷の一面が岸に固定されている場合、氷が熱膨張すると沖のほうに押し出す力が働き、沿岸にある海洋構造物にも押し込む力が働くことになる。

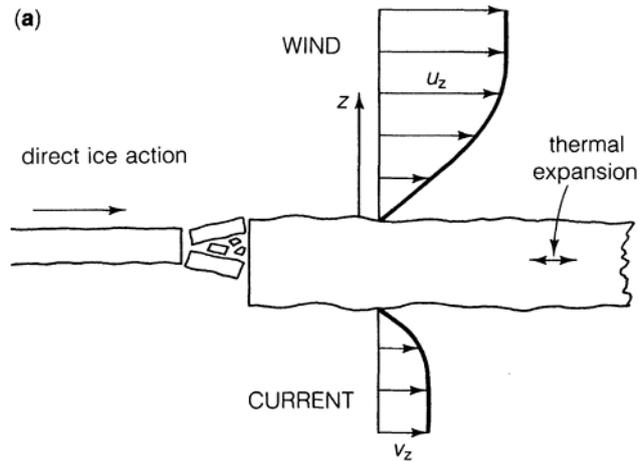


図 3.2.31 海氷の主要な動力源

(出典：Sanderson (1988) )

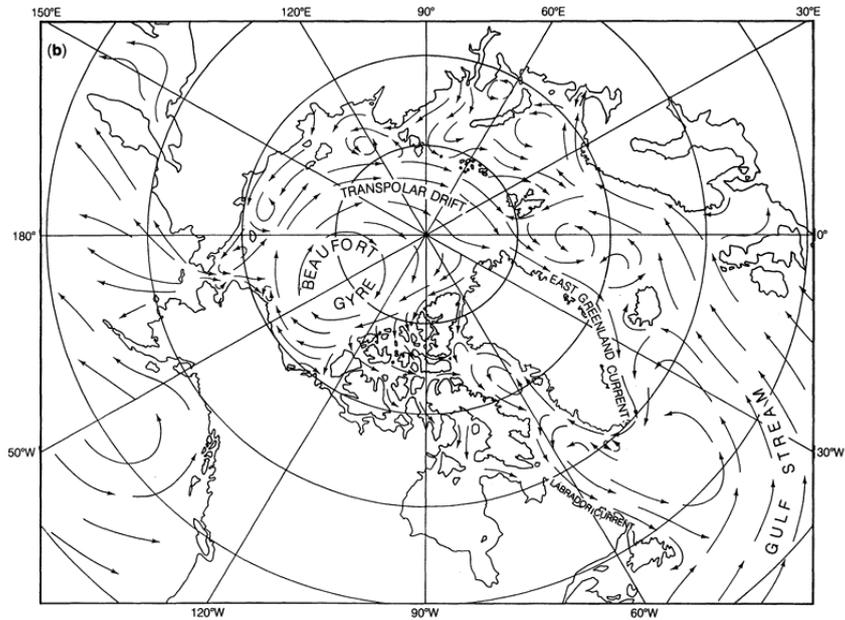


図 3.2.32 北極海の表層海流

(出典：Sanderson (1988) )

### 第3章 自然環境条件

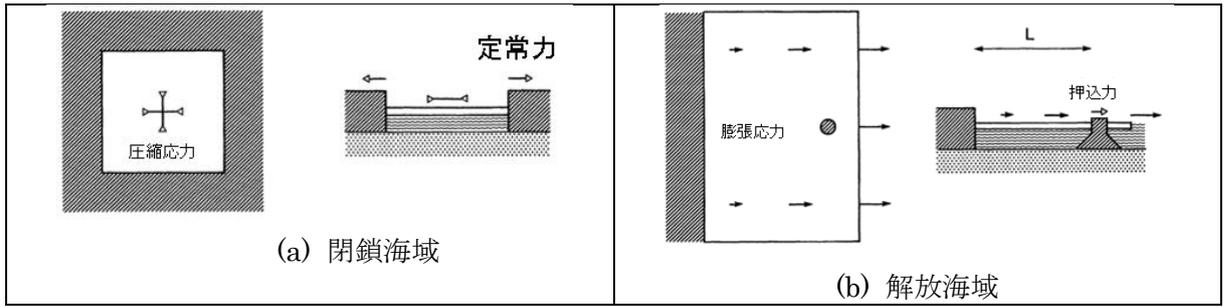


図 3.2.33 氷の熱膨張による力

#### ③ 海氷・氷山の観測

観測船や航空機による目視観測・撮影や、沿岸に設置した流水観測レーダーに加え、1970年代からは人工衛星に搭載された多重チャンネル・マイクロ波放射計（SMMR：Scanning Multichannel Microwave Radiometer）探査を用いて広範囲の海氷分布が計測可能になった。また近年では人工衛星に搭載される特殊マイクロ波画像センサー（SSMI：Special Sensor Microwave Imager）、高性能マイクロ波放射計（AMSR：Advanced Microwave Scanning Radiometer）、地球科学レーザ高度計システム（GLAS：Geoscience Laser Altimeter System）等によって正確な海氷密接度（氷に覆われている海面の占める割合）、海氷厚、氷齢が計測できるようになりつつある（図 3.2.34）。

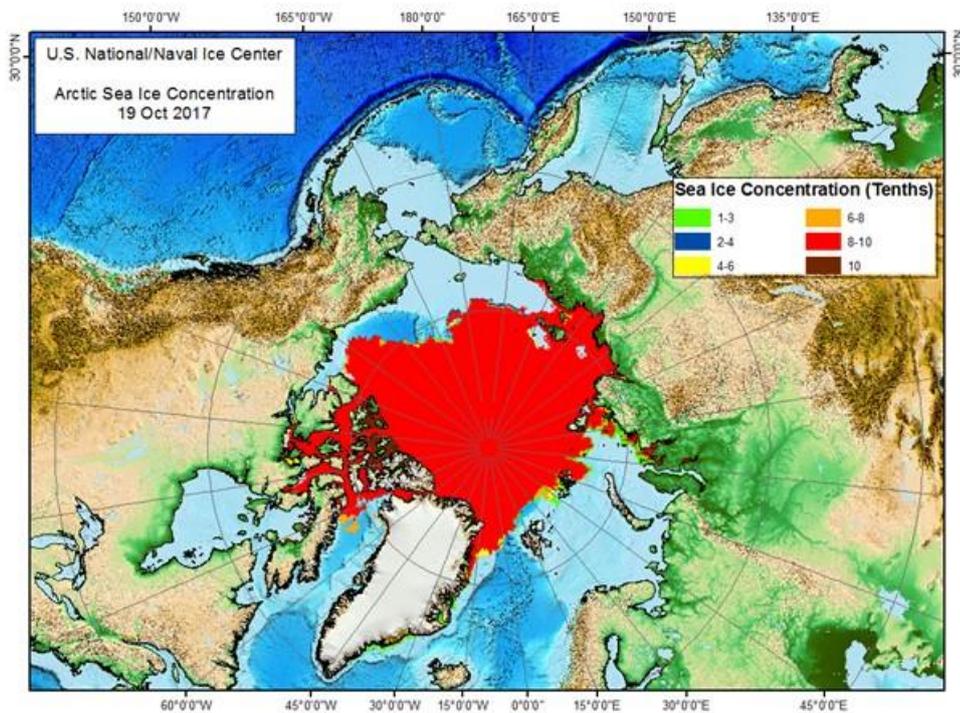


図 3.2.34 SSMI で計測した海氷密接度の例

（出典：US National Ice Center ウェブサイト）

### 第3章 自然環境条件

#### (2) 海底地形・底質

海洋構造物においては固定式、着定式はもちろんアンカーやシンカーで係留する浮体式また海底に設置するサブシー機器にとって海底の地盤、底質、地形を知ることは必要不可欠である。海底に関するハザードとしては以下のようなものが挙げられる。

- ・海底の地滑り
- ・海底地盤の液状化
- ・シャローガス（浅い地層にたまったガス）・天然メタンハイドレート層への掘削
- ・アイスガウジング

これらのハザードによる被害を防ぐためには海洋構造物を設置する前の事前海底調査が重要であるが、事前海底調査においては以下の3つの段階に分けられる。

- ・机上検討
- ・物理探査
- ・地盤調査

以下ではそれぞれの段階において行われる調査手法について述べる。

##### ① 机上検討

この段階においては、報告書、科学論文やデータベース等の様々な情報を収集し、リスク評価（risk assessment）、基本設計を行う。沿岸海域であれば海図が利用できる場合がある。日本の場合、海上保安庁水路部が刊行しており、表3.2.4のような記号を用いて底質がしるされている。また同じく海上保安庁水路部が刊行する「沿岸の海の基本図」には調査積みの海域の海底地形図、海底地質構造図、調査報告が載っており、調査報告書には海底地形地質の底質分布のみならず音波探査による地質構造の分析報告も載っている。

表 3.2.4 海図で用いられる主な底質記号

記号	意味	記号	意味
S	砂	R	岩
M	泥	Co	さんご
G	礫	Sh	貝殻
St	石		

##### ② 物理探査

机上検討において有望と思われた場合、その海域に調査船を派遣し物理探査を行う。以下に代表的な物理探査手法について述べる。

海底地形に関しては船底に取り付けられたマルチビーム測深機を用いることで図3.2.35のように広範囲の海底地形を精確に計測することができる。

底質に関しては海中に投じたサイドスキャンソナーを曳航しながら計測を行い、発振

### 第3章 自然環境条件

した音波の反射強度を色の濃淡に表す（図 3.2.36）。反射強度は海底の性状を表すことから、底質の状況が概略的に把握できる。また ROV による観測やサンプリングなども行われる。

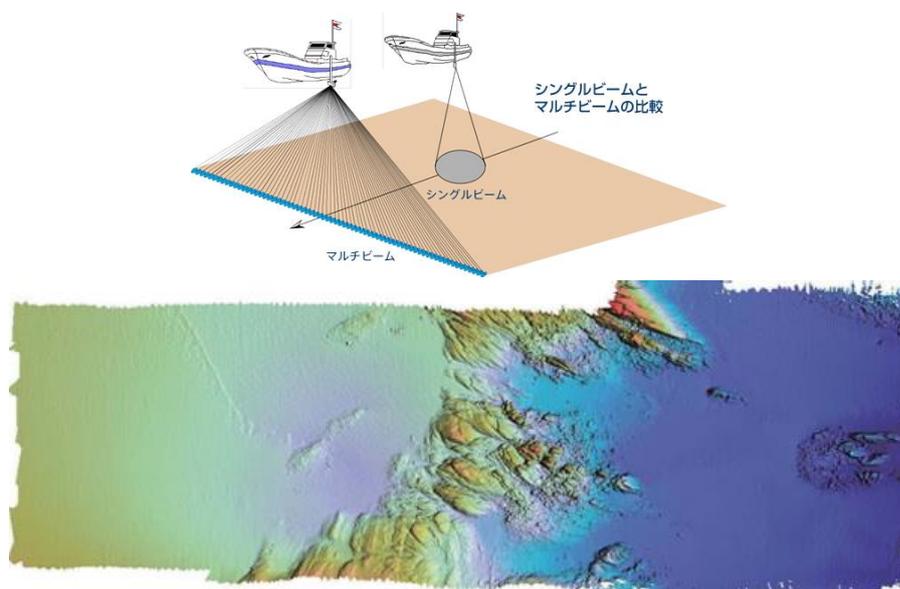


図 3.2.35 マルチビーム測深機を用いた海底地形計測例

(出典：海岸海洋調査株式会社ウェブサイト)

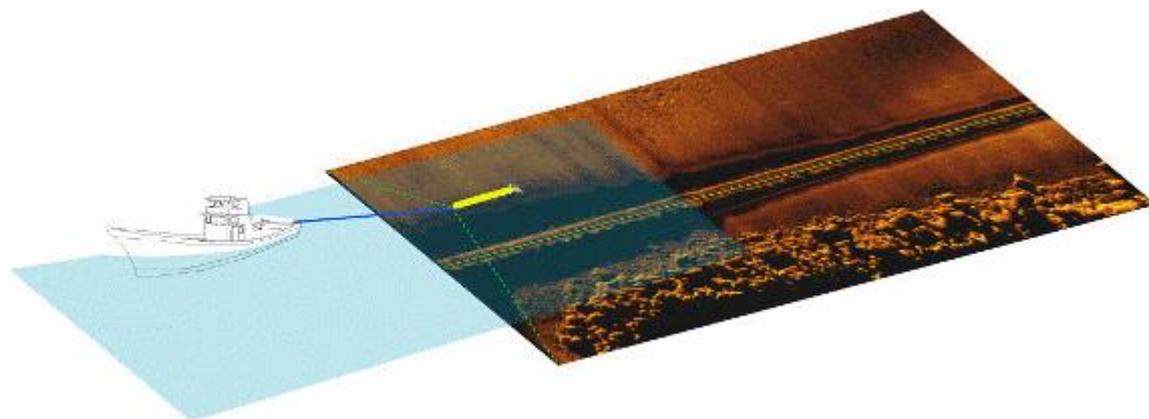


図 3.2.36 サイドスキャンソナーを用いた海底地形計測例

(出典：海岸海洋調査株式会社ウェブサイト)

地層に関してはサブボトムプロファイラーによる地層調査も行われる。図 3.2.37 のようにサブボトムプロファイラーには様々な種類があり、使用する周波数やタイプによって解像度（図 3.2.37 における R）や伝達深度が大きく異なることがわかる。図 3.2.38 に Chirper 方式のサブボトムプロファイラーとその計測例を示す。

### 第3章 自然環境条件

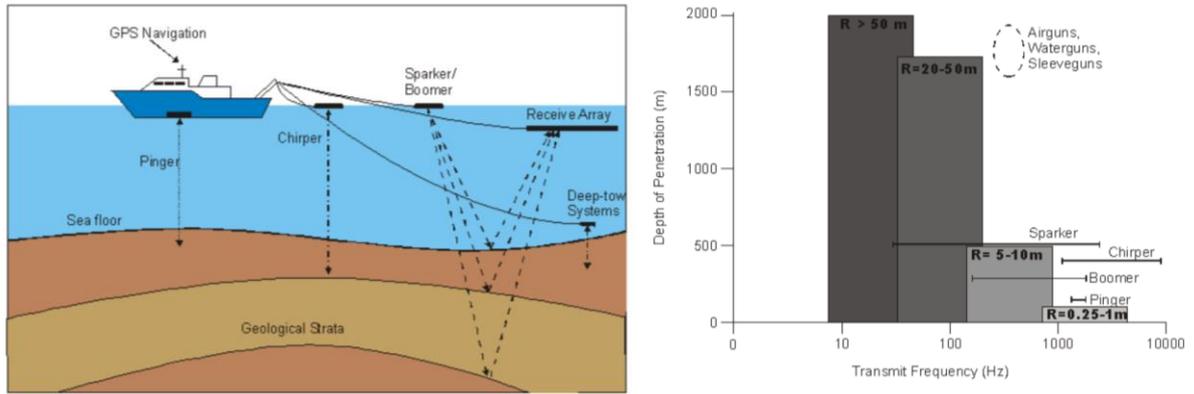


図 3.2.37 様々なタイプのサブボトムプロファイラー

(出典 : Stoker et al (1997) )

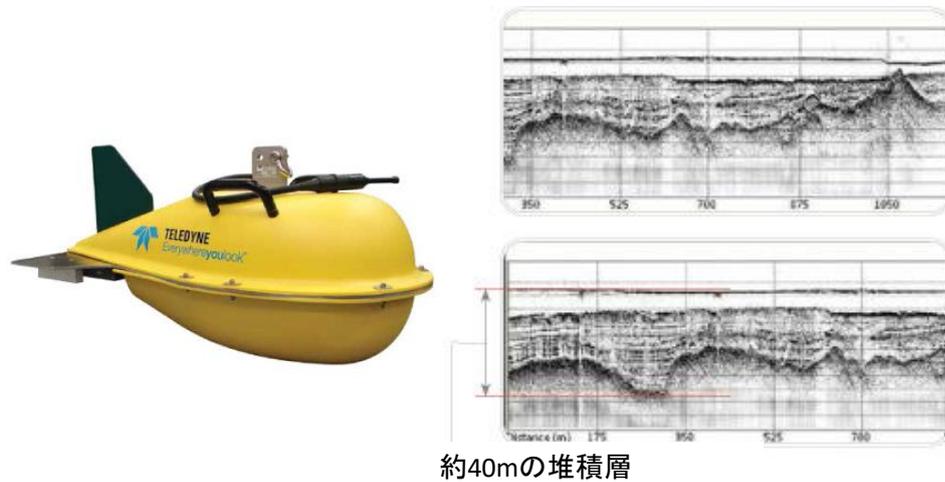


図 3.2.38 Chirper 方式のサブボトムプロファイラーとその計測例

(出典 : TELEDYNE MARINE ウェブサイト)

#### ③ 地盤調査

地盤調査の段階になると掘削リグを用いたボーリングやサンプリングが行われ、地盤の力学的な性質を調べることになる。その中で重要なものとしてサウンディング試験 (penetration test) が挙げられる。これは地層に試験用錐 (コーン) を貫入させ、その貫入抵抗値から地盤強度を計測する試験である。海底の地盤調査においてはコーン貫入試験 (CPT: Cone Penetration Test) が広く用いられる。試験用錐には先端抵抗、周面摩擦及び間隙水圧を同時に測定するピエゾコーン (図 3.2.39) を用いるのが一般的である。

### 第3章 自然環境条件

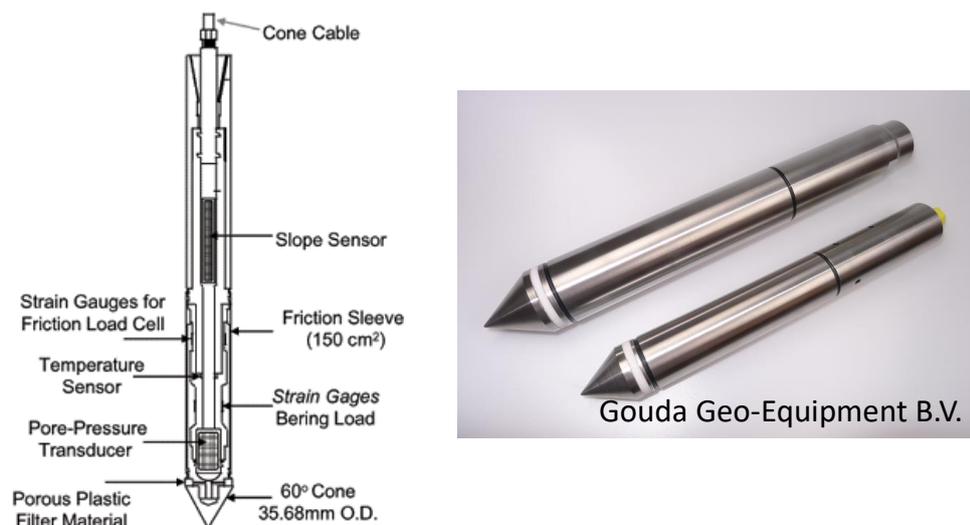


図 3.2.39 ピエゾコーン

(出典 : Michael P. Davies and Richard G. Campanella (1995) )

### 3.3 評価手法

海洋構造物の設計において、前述したような自然環境要素のデータをいかに収集し評価するかを以下で述べる。

#### 3.3.1 データベース

評価を行うためにはまずデータを収集する必要がある。しかし基本設計の段階で自らデータ計測を行うことは効率が悪く実際には難しいため、既にあるデータベースを活用することが重要である。以下に前節で取り上げた自然環境要素に関するデータベースで主に日本の機関が発行しているものを以下でいくつか紹介する。

##### (1) 波

名称	手法	データ	領域	発行機関
全国港湾海洋波浪情報網 : NOWPHAS	観測	波高 (有義、平均、1/10、最高) 周期 (有義、平均、1/10、最高) 波向	日本沿岸	国土交通省 港湾局
波浪推算データベース	再解析	有義波高 有義波周期 卓越波向	全球 日本近海	日本気象協会
日本近海の波と風データベース	波浪推算 統計値	有義波高 有義波周期 卓越波向	日本近海	海上技術安全 研究所

### 第3章 自然環境条件

#### (2) 風

名称	手法	領域	発行機関
局所風況マップ	再解析	日本近海	新エネルギー・産業技術開発機構
波浪推算データベース	再解析	全球 日本近海	日本気象協会
日本近海の波と風データベース	波浪推算 統計値	日本近海	海上技術安全研究所

#### (3) 海流・潮流

名称	手法	領域	発行機関
ARGO	観測	全球	Argo Project Office
JCOPE2 再解析データ	再解析	日本近海	海洋研究開発機構
ECCO2	再解析	全球	NASA JPL
「海流図」 「潮流図」 「黒潮流軸データセット」	観測	日本近海	日本水路協会

#### (4) 海水

名称	手法	領域	発行機関
北極域と南極域の海水分布図	観測	全球	気象庁
GCOM-W1 データ提供サービス	観測	全球	宇宙航空研究開発機構

#### (5) 海底地形・海底底質

名称	手法	領域	発行機関
「航海用海図」 「沿岸の海の基本図」 「大陸棚の海の基本図」 「M7000 シリーズ」 「M5000 シリーズ」 「JTOPO30v2-日本近 30秒グリッド水深データ」 「日本近海等深線データ」 「北西太平洋底質 メッシュデジタルデータ」	観測	日本近海	日本水路協会

3.3.2 極値統計解析

海洋構造物に限らず、あらゆる構造物の安全性を確保するためには、非常に大きな外力の発生確率を知る必要がある。そこで用いられるのが極値統計解析である。極値とはある母集団から抽出された大きさ  $N$  の標本の中の最大値（もしくは最小値）である。つまり、極値の確率分布を知ることができれば、設計に役立つことがわかる。

(1) 極値分布関数

$N$  が十分大きい場合は極値の確率分布は漸近的に表 3.3.1 の極値 I 型、極値 II 型、極値 III 型の確率密度関数に収束することが Fisher and Tippet (1928) によって解析的に示された。また表 3.3.1 のワイブル分布、対数正規分布、ピアソン III 型分布も極値統計に経験的に使用されている。ここで  $x$  : 確率変数で、 $A$ 、 $B$ 、 $k$  は極値分布関数の母数でありそれぞれ尺度母数、位置母数、形状母数と呼ばれる。図 3.3.1 に極値 I 型、対数正規、ワイブル分布の形状例を示す。また表 3.3.2 にいくつかの極値分布関数の特性値を示す。表 3.3.2 における  $\gamma$  はオイラー定数である。波浪の極値統計解析ではワイブル分布がよく用いられる。

表 3.3.1 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 (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 (フレッシュユ分布)	$F(x) = \exp\left\{-\left(1 + \frac{x-B}{A}\right)^{-k}\right\}$ : $B - kA \leq x < \infty$	$f(x) = \frac{1}{A} \left(1 + \frac{x-B}{Ak}\right)^{-(1+k)} \times \exp\left\{-\left(1 + \frac{x-B}{kA}\right)\right\}$
極値 III 型	$F(x) = \exp\left\{-\left(\frac{B-x}{A}\right)^k\right\}$ : $-\infty < x \leq B$	$f(x) = \frac{k}{A} \left(\frac{B-x}{A}\right)^{k-1} \exp\left\{-\left(\frac{B-x}{A}\right)^k\right\}$
ワイブル分布	$F(x) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{x-B}{A}\right)^k\right\}$ : $B \leq x < \infty$	$f(x) = \frac{k}{A} \left(\frac{B-x}{A}\right)^{k-1} \exp\left\{-\left(\frac{B-x}{A}\right)^k\right\}$
対数正規分布	$F(x) = \int_{-x}^x f(t) dt$ : $0 < x < \infty$	$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}Ax} \exp\left\{-\frac{(\ln x - B)^2}{2A^2}\right\}$
ピアソン III 型分布	$F(x) = \int_{-x}^x f(t) dt$ : $B \leq x < \infty$	$f(x) = \frac{1}{\Gamma(k)} \left(\frac{x-B}{A}\right)^{k-1} \exp\left(-\frac{x-B}{A}\right)$

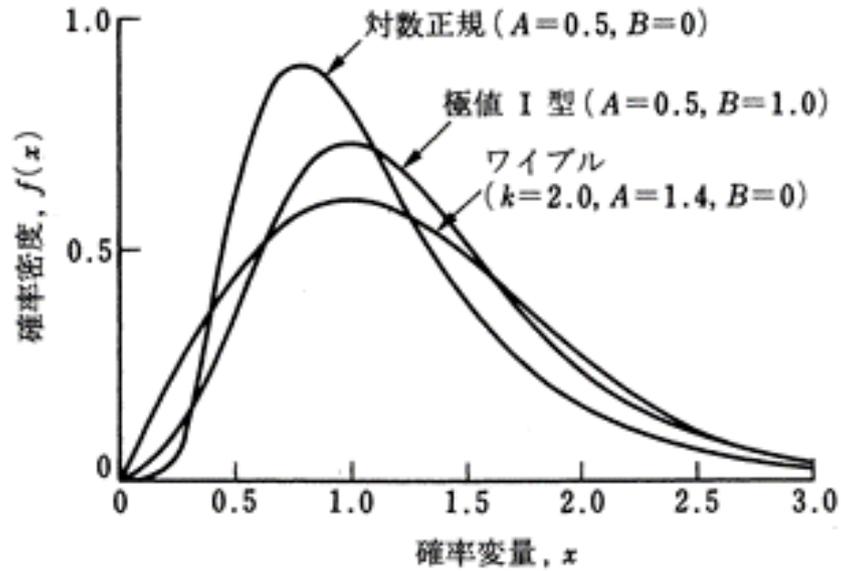


図 3.3.1 各種極値分布の確率密度関数

(出典：合田 (2008) )

表 3.3.2 極値分布関数の特性値

分布関数名	最 頻 値	平 均 値	標 準 偏 差
極値 II 型分布	$B + Ak \left[ \left( \frac{k}{1+k} \right)^{1/k} - 1 \right]$	$B + kA \left[ \Gamma \left( 1 - \frac{1}{k} \right) - 1 \right]$	$kA \left[ \Gamma \left( 1 - \frac{2}{k} \right) - \Gamma^2 \left( 1 - \frac{1}{k} \right) \right]^{1/2}$
極値 I 型分布	$B$	$B + A\gamma$	$\frac{\pi A}{\sqrt{6}}$
ワイブル分布	$B + A \left( 1 - \frac{1}{k} \right)^{1/k} : k > 1$	$B + A \Gamma \left( 1 + \frac{1}{k} \right)$	$A \left[ \Gamma \left( 1 + \frac{2}{k} \right) - \Gamma^2 \left( 1 + \frac{1}{k} \right) \right]^{1/2}$
対数正規分布	$\exp(B - A^2)$	$\exp \left( B + \frac{A^2}{2} \right)$	$\exp \left( B + \frac{A^2}{2} \right) (\exp A^2 - 1)^{1/2}$

(出典：合田 (2008) )

極値統計解析を行うためには N 個の標本を前述したいくつかの候補分布に当てはめ、極値分布関数の母数を推定し、形状を定める必要がある。当てはめて母数を推定する方法はいくつか提案されており、それらを以下に示す。

- 積率法 (MOM: Method Of Moment)
- 最尤法 (MLM: Maximum Likelihood Method)
- 最小二乘法 (LSM: Least Square Method)
- 重み付き最小二乘法 (WLSM: Weighted LSM)

ここでは合田の方法を述べる。合田の方法は極値 I 型、極値 II 型、ワイブル分布を用いて、LSM による母数推定を行うものである。しかし、極値 II 型、ワイブル分布は 3 つの母数があるのに対し、LSM では 2 母数までしか推定できないため、形状係数 k を固定して尺

### 第3章 自然環境条件

度母数 A、位置母数 B の推定を行う。ここでは、 $k=0.75, 1.0, 1.4, 2.0$  の 4 種類で当てはめを行う。適合する分布関数は相関関数の残差の平均値に対する残差の比率が最小となる分布関数を採択する。

母数の推定は次の手順で行う。

- 1) 与えられた標本のデータを大きさの順に並び替え、昇順に番号をつけたデータ順序統計量  $x_{(m)}$  に組み直す。
- 2) 標本の対象期間中における極値の総数  $N_T$  を推定し、plotting 公式 (式 (3.3.1)) と表 3.3.3 を用いて順序統計量の各データに対する非超過確率  $F_m$  を割り付ける。

$$\hat{F}_m = 1 - \frac{m - \alpha'}{N_T + \beta} \quad (3.3.1)$$

表 3.3.3 プロットイング・ポジション公式の係数

分布関数名	$\alpha$	$\alpha'$	$\beta$
極値 II 型分布	$0.44 - 0.41/k$	$0.44 + 0.52/k$	$0.12 - 0.11/k$
極値 I 型分布	0.44	0.44	0.12
ワイブル分布	$0.60 - 0.50/\sqrt{k}$	$0.20 + 0.27/\sqrt{k}$	$0.20 + 0.23/\sqrt{k}$
対数正規分布	0.375	0.375	0.25
正規分布	0.375	0.375	0.25

(出典：合田 (2008))

- 3) 非超過確率に対して表 3.3.4 より分布関数ごとに求められる基準化変量  $y_{(m)}$  を計算する。

表 3.3.4 極値分布関数に対応する基準化変量

分布	基準化変量
極値 I 型	$y_{(m)} = -\ln(-\ln \hat{F}_m)$
極値 II 型	$y_{(m)} = k\{(-\ln \hat{F}_m)^{-1/k} - 1\}$
Weibull 型	$y_{(m)} = \{(-\ln(1 - \hat{F}_m))\}^{1/k}$

- 4) 順序統計量が基準化変量の式 (3.3.2) のように直線回帰式で表せるとして最小二乗法を適用する。

$$x_{(m)} = Ay_{(m)} + B \quad (3.3.2)$$

### 第3章 自然環境条件

ホ) 上記の回帰式で得られる係数  $A$  と  $B$  を母数の推定値  $\hat{A}$  と  $\hat{B}$  とする。

また、合田の方法の基となった手法に極値分布関数として極値 I 型と Weibull 分布、 $k=0.75, 0.85, 1.0, 1.1, 1.25, 1.5, 2.0$  を用いる Petruaskas・Aagaard の方法がある。

#### (2) 再現期間

極値統計解析は長い期間に 1 度だけ起こるような異常値を推定することを目的としており、再現期間 (return period) の概念が用いられる。これはある特定の値  $x_u$  を超えるものが平均して 1 回起きる時間間隔を示す。また前述の合田の方法等によって極値分布関数  $F(x)$  が明らかな場合、極値の年平均発生率を  $\lambda$  とすると、極大値の平均発生時間単位は  $1/\lambda$  年となり  $R$  年の再現期間内の発生率は  $\lambda R$ 、非超過確率  $F(x_u)=1-1/\lambda R$  となり、再現期間  $R$  は式 (3.3.3) のように導かれる。

$$R = \frac{1}{\lambda\{1 - F(x_u)\}} \quad (3.3.3)$$

また逆に再現期間  $R$  年が与えられた場合、式 (3.3.4) を満たす  $x_R$  は  $R$  年再現確率統計量と呼ばれ、逆関数  $F^{-1}$  を用いて式 (3.3.4) と表される。

$$x_R = F^{-1}\left(1 - \frac{1}{\lambda R}\right) \quad (3.3.4)$$

基準化変量  $y_R$  を用いると、 $R$  年再現確率統計量の推定値  $\hat{x}_R$  は式 (3.3.5) で表される。

$$\hat{x}_R = A\hat{y}_R + B \quad (3.3.5)$$

### 3.4 まとめ

本章では海洋構造物に関係すると思われる自然環境条件について述べた。海洋構造物の強度設計や海洋再生可能エネルギーの資源量を推定する上で事前に設置海域の自然環境条件を知ることは必要不可欠である。従来は海洋構造物の設置海域に多くの観測データがないことも多く、遠くの観測点のデータから設置海域の海象・気象を推定するしかなかったが、近年になって大気循環モデルなど、海気象の数値シミュレーションモデルの発展は目覚しく、予報だけでなく再解析を行うことで任意の海域の過去の海気象データを得ることも難しくなくなってきた。またシミュレーションだけでなく、観測においても人工衛星を用いたりリモートセンシング技術の発達により海底地形から天候、海氷情報まで広範囲かつ正確なデータも得られるようになってきた。今後は得られたこの膨大なデータをどのように活用していくかが重要な課題となっており、すでにデータ同化による波浪モデル等の高精度化の研究に活用されつつある (Fefevre and Aouf (2012), Sasaki (2016))。また従来、日本近海においては大規模な海洋構造物が設置されることはほとんどなかったが、平成 19 年に海洋基本法が施行されて以来、日本近海での洋上風力発電やメタンハイドレート、海底鉱物資源等の開発の機運が高まっている中で、本章では特に詳しく取り上げなかったが台風、黒潮、地震やそれに伴う津波等の日本近海特有の自然環

### 第3章 自然環境条件

境条件についても考慮していく必要があるであろう。

#### <データベース URL>

「全国港湾海洋波浪情報網：NOWPHAS」 <https://nowphas.mlit.go.jp/pastdata/>

「波浪推算データベース」 <https://www.jwa.or.jp/service-business/service/44.html>

「日本近海の波と風データベース」 [https://www.nmri.go.jp/wwjapan/namikaze\\_main.html](https://www.nmri.go.jp/wwjapan/namikaze_main.html)

「局所風況マップ」 <http://app8.infoc.nedo.go.jp/nedo/>

「ARGO」 <https://argo.ucsd.edu/data/>

「JCOPE2」 <http://www.jamstec.go.jp/jcope/htdocs/distribution/index.html>

「ECCO2」 <https://www.ecco-group.org/products.htm>

「日本水路協会海図ネットショップ」

[https://www.jha.or.jp/shop/index.php?main\\_page=categories&language=jp](https://www.jha.or.jp/shop/index.php?main_page=categories&language=jp)

「北極域と南極域の海水分布図」

[http://www.data.jma.go.jp/kaiyou/db/seaice/global/global\\_extent.html](http://www.data.jma.go.jp/kaiyou/db/seaice/global/global_extent.html)

「GCOM-W1 データ提供サービス」

[http://sharaku.eorc.jaxa.jp/AMSR/relay/product\\_data\\_j.html](http://sharaku.eorc.jaxa.jp/AMSR/relay/product_data_j.html)

### 第3章 自然環境条件

#### <参考資料>

- Castro-Orgaz et al. Non-Hydrostatic Free Surface Flows. Springer, 2017, 696p.
- MiraCosta College, Oceanography 101,  
<https://gotbooks.miracosta.edu/oceans/chapter10.html> (cited 2020-12-31)
- 国土交通省. "東日本大震災の記録". 国土交通省. 2012.  
<http://www.mlit.go.jp/saigai/kirokusyu.html> (cited 2020-12-31).
- 港湾空港技術研究所. "平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震による津波のGPS波浪計による観測結果について". 港湾空港技術研究所. 2011, <http://www.pari.go.jp/info/tohoku-eq/20110328pari.html> (cited 2020-12-31)
- 合田良實. 数値シミュレーションによる波浪の標準スペクトルと統計的性質. 海岸工学講演会論文集. 1987, 34, p.131-135.
- Ochi M. K.; Hubble, E. N. On Six-parameter Wave Spectra. Proceedings of 15<sup>th</sup> International Conference Coastal Engineering, 1976, p.301-328.
- Mitsuyasu, H.; Tasai, F.; Shuhara, T.; Mizuno, S.; Ohkusu M.; Honda T.; Rikiishi, K.: Observation of the Directional Spectrum of Ocean Waves Using a Cloverleaf Buoy. Journal of Physical Oceanography. 1975, Vol. 5, No. 4, p.750-760.
- 港湾空港技術研究所. 全国港湾海洋波観測30ヵ年統計(NOWPHAS1970-1999). 港湾空港技術研究所資料. 2002, No.1035.
- Kimura, A. Statistical properties of random wave groups. Proc. 17<sup>th</sup> Int. Conf. Coastal Eng. 1980, p.2955-2973.
- Longuet-Higgins, M.S. Statistical properties of wave groups in a random sea state. Phil. Trans. Roy. Soc. London, Ser.A. 1984, Vol.312, p.219-250.
- Funke, E., and E., Mansard. On the synthesis of realistic sea states. Proc. 17<sup>th</sup> Int. Conf. Coastal Eng. 1980, p.2974-2991.
- 山内保文. 不規則現象論. 海文堂, 1986, 337p.
- Pierson, W. J.; G. S. Neumann; R. W. James. Practical methods for observing and forecasting ocean waves by means of wave spectra and statistics. Project AROWA Technical Report, 1953, No. 1.
- The WAMDI group. The WAM Model-A Third Generation Ocean Wave Prediction Model. Journal of Physical Oceanography. 1988, Vol.18, p.1775-1810.
- 橋本典明; 河合弘泰; 永井紀彦. NOWPHAS 波浪観測データを同化した波浪推算法の開発とその特性の検討. 港湾空港技術研究所報告. 2006, 045-02-01, p.3-28.
- 間瀬肇; 平尾博樹; 国富将嗣; 高山知司. SWANによる波浪推算システム—閉鎖性湾内における波浪推算への適用—. 京都大学防災研究所年報. 2001, 第44号, B-2, p.333-351.
- Environmental Modeling Center. "WaveWatchIII". NOAA.  
<https://polar.ncep.noaa.gov/waves/wavewatch/> (cited 2020-12-31)
- Delft University of Technology. "SWAN". Delft University of Technology.

### 第3章 自然環境条件

<https://www.tudelft.nl/en/ceg/about-the-faculty/departments/hydraulic-engineering/sections/environmental-fluid-mechanics/research/swan/> (cited 2020-12-31)

- 竹内仁；高野洋雄；山根彩子；松枝聡子；板倉太子；宇都宮忠吉；金子秀毅；長屋保幸. 日本周辺海域における波浪特性の基礎調査及び波浪モデルの現状と展望. 測候時報. 2012, 第79巻(特別号), p.25-58.
- 国際海洋科学技術協会. 海洋構造物の振動問題－振動源となる外乱及び外力の予測技術－. 国際海洋科学技術協会, 1988, 276p.
- 光田寧. 多良間島における台風観測について. 構造物の耐風性に関する第4回シンポジウム論文集, 1976, p.1-8.
- Hoven V. I. Power Spectrum of Horizontal Wind Speed in the Frequency Range from 0.0007 to 900 Cycles per Hour. Journal of Meteorology. 1957, Vol. 14, Issue 2, p.160-164.
- 日本造船学会 海洋工学委員会 性能部会. 沿岸海域の自然環境と構造物－沿岸海域における海洋構造物設計上の諸問題－. 1992, 376p.
- National Center for Atmospheric Research. “MM5 community model”. National Center for Atmospheric Research. <http://www2.mmm.ucar.edu/mm5/> (cited 202-12-31)
- National Center for Atmospheric Research. “The weather research and forecasting model”. <https://www.mmm.ucar.edu/weather-research-and-forecasting-model> (cited 2020-12-31)
- 気象庁ウェブサイト. メソモデル・局地モデル. <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/whitep/1-3-6.html> (cited 2021-2-3)
- 酒井治孝. 地球学入門 - 惑星地球と大気・海洋のシステム. 東海大出版, 2003, 332p.
- MIT. “About MITgcm”. MIT. <http://mitgcm.org/about-mitgcm/> (cited 2020-12-31)
- Center for Coastal Physical Oceanography. “The Princeton Ocean Model”. Old Dominion University. <http://www.ccpo.odu.edu/POMWEB/> (cited 2020-12-31)
- Mellor, G.L.; Hakkinen, S.; Ezer, T.; Patchen, R. "A generalization of a sigma coordinate ocean model and an intercomparison of model vertical grids". Ocean Forecasting: Conceptual Basis and Applications. Nadia Pinardi. Springer, 2002, p.55-72.
- NASA ウェブサイト. NASA Views Our Perpetual Ocean . <https://www.nasa.gov/topics/earth/features/perpetual-ocean.html> (cited 2021-2-3)
- Miyazawa, Y.; R. Zhang, X. Guo; H. Tamura; D. Ambe; J. S. Lee; A. Okuno; H. Yoshinari; T. Setou; K. Komatsu. Water mass variability in the western North Pacific detected in a 15-year eddy resolving ocean reanalysis. Journal of Oceanogr. 2009, Vol. 65, p.737-756.
- 宮澤泰正. "海洋モデリング入門,愛媛大学理学部講義資料". 2014, [http://www.jamstec.go.jp/frgc/research/d1/miyazawa/20140908\\_kougi\\_intro.pdf](http://www.jamstec.go.jp/frgc/research/d1/miyazawa/20140908_kougi_intro.pdf) (cited 2020-12-31)
- 海洋研究開発機構 (JAMSTEC) . “日本近海の海洋変動予測システム”. JAMSTEC. <http://www.jamstec.go.jp/jcope/htdocs/home.html> (cited 2020-12-31)
- 北川弘光；小野延雄；山口一；泉山耕；亀崎一彦. 北極海航路 東アジアとヨーロッパを結

### 第3章 自然環境条件

ぶ最短の海の道. シップ・アンド・オーシャン財団. 扇興社, 2000, 242p.

- Ikeda, M.; Wang, J.; A. Makshtas. Importance of clouds to the decaying trend in the Arctic ice cover. *Journal of Meteorological Society of Japan*. 2003, Vol.81, No.1, p.179-189.
- Gazprom ウェブサイト. Prirazlomnoye field.  
<https://www.gazprom.com/projects/prirazlomnoye/> (cited 2021-2-3)
- 大島正直. 氷海域における石油開発用構造物. *石油技術協会誌*. 1981, 第46巻, 第2号, p.46-57.
- Mike Paulin; Jonathan Caines. The Evolution of Design Tools for Arctic Subsea Pipelines. *Proceedings of Arctic Technology Conference*. 2016. Doi:  
<https://doi.org/10.4043/27374-MS> (cited 2020-12-31)
- El Tahan M.S et al. Forecast of iceberg ensemble drift. *Proceedings of Offshore Technology Conference*. 1983, OTC4460, p.151-158.
- T.J.O. Sanderson. *Ice Mechanics Risk to Offshore Structure*. Graham & Trotman, 1988, 254p.
- US National Ice Center ウェブサイト. <https://usicecenter.gov/Products/ArcticHome> (cited 2021-2-3)
- 海岸海洋調査株式会社ウェブサイト. <http://www.engan.jp/chikei/multibeam.html> (cited 2021-2-3)
- Stoker, M.S., Pheasant, J.B., Josenhans, H.. "Seismic methods and interpretation." In T.A. Davies, T. Bell, A.K. Cooper, H. Josenhans, L. Polyak, A. Solheim, M.S. Stoker, J.A. Stravers (Eds.), *Glaciated Continental Margins: An Atlas of Acoustic Images*. Chapman and Hall, 1997, 315p.
- Hydronav ウェブサイト <http://www.hydronav.com/pdf/CHIRP-III-SUB-BOTTOM-PROFILER-brochure.pdf> (cited 2021-2-3)
- Michael P. Davies, Richard G. Campanella. Piezocone Technology: Downhole Geophysics for the Geoenvironmental Characterization of Soil. *Proceedings of Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*. 1995, p.171-180.
- Fisher, R., Tipplet, L. Limiting forms of the frequency distribution of the largest or smallest member of a sample. *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*. 1928, Vol. 24, Issue 2, p. 180-190.
- 合田良實. 耐波工学. 港湾・海岸構造物の耐波設計. 鹿島出版, 2008, 430p.
- Fefevre J. M.; Aouf L. Latest developments in wave data assimilation. *Proceedings of ECMWF Workshop on Ocean Waves*. 2012, p.175-188.
- Sasaki W. Impact of Satellite Data Assimilation in Atmospheric Reanalysis on the Marine Wind and Wave Climate. *Journal of Climate*. 2016, Vol. 29, No. 17, p.6351-6361.
- 
- 橋本典明 ; 川口浩二. 波浪推算モデルとその利用. *海洋開発論文集*. 2003, 第19巻,

### 第3章 自然環境条件

p.53-58.

- 峯松宏明. 気象庁で現業運用している波浪モデル. 天気. 2009, 56(8), p.669-674.
- 橋本典明; 川口浩二; 真期俊行; 永井紀彦. 第3世代波浪推算法(WAM)の推算精度に関する検討. 港湾空港技術研究所報告. 1999, vol.38, No.4, p.3-48.
- 高野洋雄. 有義波法による波浪推算—現業での利用を目的として—. 測候時報. 2011, 第78巻, p.185-201.
- 時岡達志; 山岬正紀; 佐藤信夫; 気象の数値シミュレーション. 東京大学出版会. 1993, 256p.
- USGS. "Circum-Arctic Resource Appraisal: Estimates of Undiscovered Oil and Gas North of the Arctic Circle". 2008, <https://pubs.usgs.gov/fs/2008/3049/fs2008-3049.pdf> (cited 2020-12-31)
- Randolph M. and Gourvenec S. Offshore geotechnical engineering. Spon Press, N.Y., 2011, 550p.
- 土木学会 海岸工学委員会 研究現状レビュー小委員会. 新しい波浪算定法とこれからの海域施設の設計—性能設計法の確立に向けて—. 土木学会, 2001, 256p.
- 沿岸開発技術研究センター. 沿岸波浪・海象観測データの解析・活用に関する解説書. 沿岸開発技術研究センター, 2000, 181p.

### 4 海洋構造物に作用する荷重と応答

#### 4.1 はじめに

海洋構造物は環境からの荷重（外力）を受けて揺れや撓み（応答）を生じる。過大な揺れや撓みは係留装置や構造物自身の破壊に繋がる。海洋構造物を設計する場合、安全性と稼働性を考慮する必要がある。安全であるとは想定する最悪の海象条件（例えば前述した再現期間を100年とした場合の風速とそれに伴う波高と流速）において構造物が壊れないこと（終局限界での強度）、耐用年数の間、構造物が壊れないこと（疲労限界での強度）を指す。稼働性とは、構造物の揺れが激しい又は構造物が壊れないように退避する必要があり構造物上での作業が出来ない日を除いて年間何日作業できるかを指す。

海洋構造物の形式は固定式と浮体式の二つに大きく分かれる。どちらの形式を採用するかは、構造物を設置する予定海域の水深が強く影響する。水深が浅ければ固定式が有利であり、水深が深くなると浮体式が有利となるのが一般的である。

安全性と稼働性を考慮するため、浮体構造物では動揺解析と構造解析、固定構造物では構造解析を行う必要がある。本章では動揺解析と構造解析の手法について解説する。なお、位置保持技術（係留・DPS）については次章にて解説する。また、SPSについては波浪荷重の影響が小さいことから本章では対象外とする。

#### 4.2 座標系と6自由度

物体の運動（動揺は運動の一形態）を扱う場合、先ず座標系を定義する必要がある。海洋構造物の分野ではZ軸が鉛直上向きを正とする直交右手系を用いる。船舶の分野に倣い、X軸方向の並進運動を前後揺（surge）、Y軸方向の並進運動を左右揺（sway）、Z軸方向の並進運動を上下揺（heave）、X軸周りの回転運動を横揺（roll）、Y軸周りの回転運動を縦揺（pitch）、Z軸周りの回転運動を船首揺（yaw）と呼ぶ。これらの計6種類の運動を合わせて6自由度運動もしくは単に6（ろく）自由度（6DOF: 6(six) Degree Of Freedom）、と呼ぶ。図4.2.1に座標系および6自由度を示す。この6自由度のうち heave、roll および pitch は動揺した場合に元の姿勢に戻ろうとする「復原力（restoring force）」および「復原力モーメント」が生じるが、surge、sway および yaw については、復原力および復原力モーメントが発生しない。詳細については後述する。

動揺解析を行う基礎となる運動方程式を記述する座標系には空間に固定された座標系（空間固定座標系）と対象物体に固定された座標系（物体固定座標系）がある。前者はグローバル座標系と呼ばれることもある。前者は慣性系、後者は一般に非慣性系である。

慣性系で運動方程式を記述すると物体の加速度運動に伴う見かけの外力を考慮する必要が無い。また、慣性系の座標原点Oはどこに置いても問題ない。解析対象に即して、海底に置く場合、海面に置く場合、物体固定座標系の原点の初期位置に置く場合等がある。海洋構造物の動揺解析では海面に置くのが一般的である。

運動方程式をグローバル座標系で記述する場合でも、慣性モーメント、係留ラインによる復

## 第4章 海洋構造物に作用する荷重と応答

原力モーメント、風や波の外力モーメントの計算のために物体固定座標系が必要である。物体固定座標系の原点を物体の重心に一致させると慣性マトリクスが対角項のみになりシンプルであるが、外力モーメントの算出が一般に構造物の中心の海面レベルを原点として行われるため、物体固定座標系の原点  $O$  も構造物の中心の海面レベルに一致させる必要がある。

慣性マトリクスや外力の詳細は後述する。

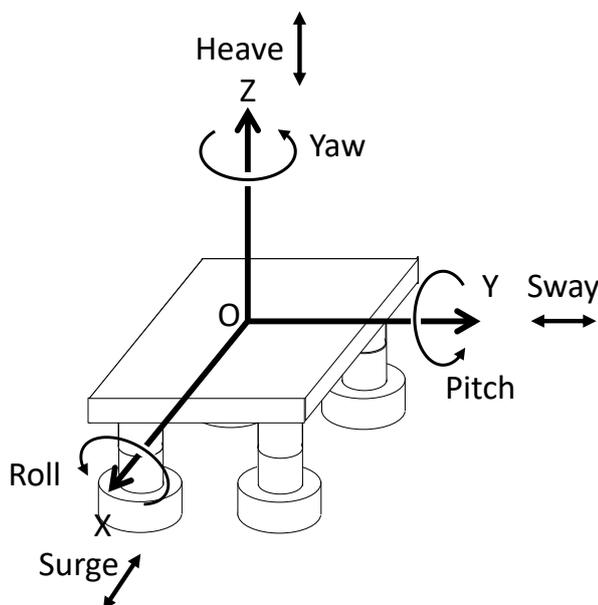


図 4.2.1 座標系と 6 自由度の定義

### 4.3 浮体構造物の動揺解析

浮体構造物（以後、浮体と呼ぶ）の特徴は波浪中で動揺することである。安全性・稼働性の観点から、浮体の動揺解析は、3章で示した自然環境（風・波・潮流）条件において、どのような動揺が発生するかを明らかにし、如何に動揺を少なくするかが目的となる。

浮体の動揺解析は「波の解析」（3.2.1(1)）と同様に微小振幅仮定を前提としている。これによって動揺を記述する運動方程式は線形化又は準線形化され解法が容易となる。大波高の波浪中の現象も微小振幅仮定の延長線上で解析が行われる。微小振幅に対比する概念を有限振幅という。有限振幅の現象についてはここでは扱わない。解析手法は大きく分けて周波数領域法と時間領域法に分類される。

海域に設置された浮体が遭遇する波は3章で示したように「不規則波」であるが、不規則波は式(3.2.7)および式(3.2.1)から分かるように規則波を寄せ集めたものである。この特性を生かし、浮体に入射する（浮体が遭遇する）波を規則波に分割し、それぞれの規則波毎に運動方程式を解くことで、ある周波数（もしくは周期）の規則波に対する浮体の動揺量を求めてゆく方法が周波数領域法である。この周波数領域法により求められる浮体の動揺特性（ある周波数の波に対する浮体の動揺振幅と位相差）を周波数応答関数（frequency response function）と呼ぶ。

一方、時間領域法は運動方程式を解析的あるいは数値的に直接時間積分する手法であり、力

## 第4章 海洋構造物に作用する荷重と応答

学系の非線形性や時間依存性を考慮することができる。時間領域法で得られるデータは統計的にはサンプルであり、複数の解析結果を用いて統計解析を行うことで統計量を推定する。

本章では、浮体の動揺の特徴と周波数領域解析の考え方を説明し、次に時間領域での一体解析（複数浮体や係留・ライザー等）について解説する。

### 4.3.1 周波数領域解析

周波数領域解析は、先に述べたようにある周期（周波数）の波が浮体に入射した際に、浮体がどのような動揺をするか、すなわち「規則波中における浮体の応答特性」を求める方法であり、波の周期を変化させていく（例えば周期 1sec の波から 20sec まで）とそれに伴う動揺特性（応答関数（response function））が得られる。

入射波スペクトル（3章参照）と得られた応答関数（の振幅の二乗）を掛け合わせると、入射波スペクトル × 動揺特性（応答関数）＝動揺スペクトルを求めることができる。動揺スペクトルについても波スペクトルと同じく 3.2.1(3)④d) で示した統計量を求めることができる。

ここで、「動揺」と「運動」の言葉の使い方について触れておく。本来、動揺とは物体が揺れること、運動とは物体が動くことを指し、運動の方が広い概念となっている。しかし、浮体の波浪中応答を運動と呼ぶか動揺と呼ぶかは現象毎に言い習わされたものがあるため、極力動揺で統一するが、本章では言い習わしを優先するものとする。

#### (1) 上下揺 (heave)

##### ① 運動方程式と固有周期

上下揺 (heave) は浮体の最も特徴的な動揺である。先ず、heave の特徴を観てみよう。

図 4.2.1 のように、浮体は円柱や直方体の組合せであることが多く、直立した円柱は動揺解析における基本と見なすことができる。roll や pitch との連成がなく、浮体が純粋に上下に動揺していると仮定すると規則波中の直立円柱の heave の運動方程式は次式のようになる。

$$(M + m)\ddot{z} + N\dot{z} + Kz = f_z(t) \quad (4.3.1)$$

ここで、 $M$ : 浮体質量、 $m$ : 付加質量、 $N$ : 減衰係数、 $K$ : 復原力係数、 $f_z$ : 波等による heave の外力である。

水に浮く木片等で円柱を作り（円柱の直径は高さに比べ十分大きいとする）水に浮かべて真上から手で押し込んだとする。この時、円柱が手を押し返してくる力が heave の復原力である。復原力係数は上下変位  $z$  に対する比例係数である。アルキメデスの原理の通り没水体積の増加分に相当する水の重量に等しい力（浮力）が復原力として働く。釣り合い時に水面を切る面積（水線面積）を  $A$  とすると復原力係数は式 (4.3.2) で示される。

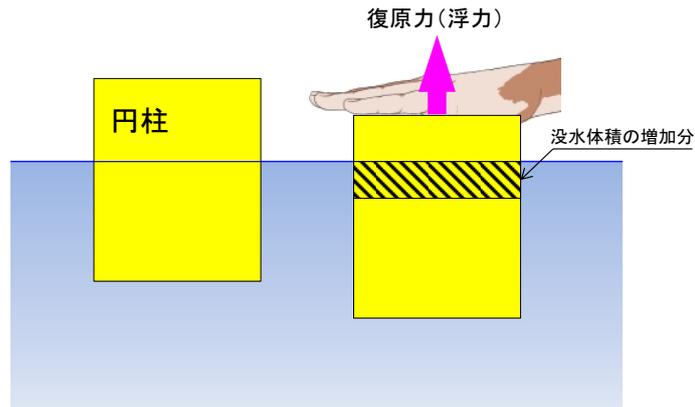


図 4.3.1 heave の復原力

$$K = \rho g A \quad (4.3.2)$$

ここで、 $\rho$  : 水の密度、 $g$  : 重力加速度である。

浮体の質量  $M$  は釣り合い時の没水体積（排水容積）と水の密度の積に等しく、円柱の場合式 (4.3.3) で示される。

$$M = \rho A d \quad (4.3.3)$$

ここで  $d$  は喫水（水面下の深さ）である。

付加質量とは浮体が加速運動をする時に引きずって動かす周囲の水の質量に相当する。浮体の質量と付加質量の和を見かけの質量と呼ぶ。付加質量の値は浮体形状によって異なるが、動揺周期が長いと大きく、動揺周期が短いと小さくなる傾向を示す。見かけの質量は質量係数  $C_m$  を用いて式 (4.3.4) のように表すこともできる。

$$M + m = C_m M \quad (4.3.4)$$

木片を水に浮かべて手で下に押し込みその手を放すと、木片は勢いよく浮き上がり、上下に 2~3 回揺れて止まる。これは浮体の heave に関する自由動揺試験を行ったことに相当する。揺れの周期はおよそ heave の固有周期に相当する。振動理論から、物体の固有周期  $T_n$  は式 (4.3.5) で与えられる。

$$T_n = 2\pi\sqrt{C_m M / K} = 2\pi\sqrt{C_m d / g} \quad (4.3.5)$$

式 (4.3.5) から、直立円柱浮体の固有周期が喫水  $d$  によって決まることが判る。図 4.3.2 に喫水と固有周期の関係を示す。 $C_m=1.2$  とすると、喫水 5m で固有周期が約 5sec、喫水 20m で約 10sec になる。

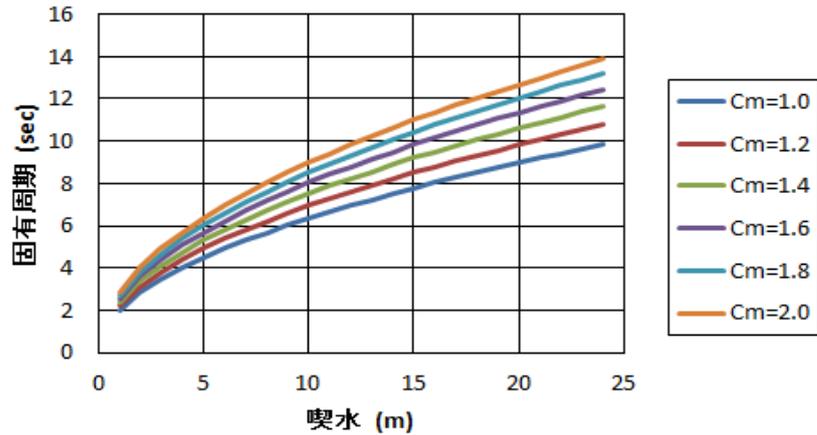


図 4.3.2 喫水と固有周期の関係

一般に固有周期が外部加振周期に近いと同調現象により振幅が極端に大きくなる場合がある。浮体の場合、外部加振周期は波の周期と考えて良い。荒れた海象では不規則波のピーク周期はおよそ 8~16sec 程度で heave の固有周期と近い値となっていることから何らかの対応が必要である。詳細は後述する。

## ② 波強制力

浮体は規則波中で入射波と同じ周期で波の振幅に比例する力を受ける。これを波強制力 (wave exciting force) という。波強制力・造波減衰係数・付加質量は流体のポテンシャル理論 (水を非圧縮・非粘性の流体と考える流体力学の理論) により算出される浮体の没水表面の変動圧を積分して求められる。ここでも波の微小振幅が仮定され、浮体は空間に固定されているとする。造波減衰係数については次項で説明する。

波強制力を求める変動圧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。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力と呼ぶ。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 Froude-Krylov (フルード・クリロフ) の仮定とよび、その力を Froude-Krylov 力と呼ぶ。

変動圧の振幅は深度 (水面からの距離) が深くなると深度  $z>0$  の指数関数  $\exp(-kz)$  に比例して小さくなる。比例係数  $k$  は波数と呼ばれ、無限水深 (式 (3.2.2) で水深  $h$  を無限大にすると  $\tanh(kh)=1$  となる) では  $k=\omega^2/g$  である。

周波数ゼロの極限では、波長は無限大となり浮体表面での波の反射が無くなる (波が完全に透過する) とともに波数も  $k=0$  になり、 $\exp(-kz)=1$  となる。このため、波圧の変動振幅は水位変動に伴う静水圧の変動振幅に漸近する。波長が無限大なので浮体底面の波圧は一様と見なすことができる。

波長が極めて長い場合、規則波中の直立円柱に働く上下方向の Froude-Krylov 力  $f_z$  は次式で近似できる。

$$f_z = \rho g A \zeta_a \cos(\omega t) \quad (4.3.6)$$

ここで、 $\rho$ ：海水密度、 $g$ ：重力加速度、 $A$ ：浮体底面の面積、 $\zeta_a$ ：波振幅、 $\omega$ ：入射波の円周波数である。

周波数無限大の極限では、波数  $k$  が無限大となり、 $\exp(-kz)=0$ 、即ち波圧の振幅がゼロになるため波強制力の振幅はゼロに漸近する。

### ③ 応答関数

海岸で小さい木片を海に浮かべると、木片は波に乗って波振幅と同じ振幅で上下に揺れる。一方、大きな船はあまり揺れない。この違いがどのように生じるかは動揺の周波数応答関数を調べると判る。一般の振動理論では周波数応答関数とは力の振幅に対する変位の振幅の比であるが、浮体動揺解析では入射波振幅と動揺振幅の比とする。正確には振幅比と入射波に対する位相差のセットを応答関数と呼ぶ。振幅のみの場合 RAO (Response Amplitude Operator) と呼ばれる。

一般に、振動体の RAO は入力周波数に対して低周波数で一定値に漸近し、高周波数でゼロに漸近する。また、固有周波数 (natural frequency、固有周期の逆数) の近傍で同調現象が生じて RAO はピークを示す。ただし、減衰力が大きい場合はピークが生じない場合もある。前項の heave の自由動揺で、heave が 2~3 回で止まるということは、極めて強い減衰力が働いていることを意味する。

浮体が上下に揺れると、同心円状に発散波が発生する。発散波は浮体の運動エネルギーを遠方に運び去るので浮体の揺れは減衰する。即ち、減衰力が働いている。これを造波減衰力と呼ぶ。上下速度に対する比例係数を造波減衰係数と呼ぶ。

減衰力には造波減衰力の他に、浮体周りの流れ (浮体が動揺している状態で、浮体に乗った人が周りの流体を観察すると振動流が起きているように見える) の剥離に起因する粘性減衰力が存在する。粘性減衰力は速度に比例する項と速度の二乗に比例する項が存在する。それぞれの比例係数は浮体形状や動揺振幅、周波数によって変化する。

Roll や pitch との連成がなく、粘性減衰が無視できて、波強制力として Froude-Krylov 力のみが作用していると仮定すると規則波中の直立円柱浮体の heave の運動方程式は次式のようになる。

$$(M + m)\ddot{z} + N\dot{z} + \rho g A z = \rho g A \zeta_a \exp(-kd) \cos(\omega t) \quad (4.3.7)$$

なお、 $M$ ：浮体質量、 $m$ ：付加質量、 $N$ ：造波減衰係数、 $\rho$ ：海水密度、 $A$ ：水線面積、 $\zeta_a$ ：波振幅、 $\omega$ ：入射波の円周波数、 $g$ ：重力加速度、 $k$ ：波数、 $d$ ：喫水である。

ここで、浮体の上下変位を

$$z = Z_a \cos(\omega t) + Z_b \sin(\omega t) \quad (4.3.8)$$

として式 (4.3.7) に代入して  $Z_a$  と  $Z_b$  について解くと heave の応答関数が得られる。

波強制力における反射波も考慮してポテンシャル理論により求めた円柱の heave の応答関数を図 4.3.3 に示す。直径は 20m、喫水は 100m である。有義波高 10m、ピーク周期 15sec の時の JONSWAP 型スペクトル (3.2.1(3)④b)参照) を併記した。粘性減衰を考慮していないので RAO は高めのピークを示している。また、長周期 (低周波数) 側で 1 に漸近している。このことは固有周期よりも長周期側で浮体は入射波振幅とほぼ同等の振幅で上下に揺れることを示している。木片は固有周期が極めて短いため波の周期が木片の固有周期よりも大幅に長く、波に乗ってしまう。大きな船は固有周期が長いので波周期が船の固有周期よりも短い場合、船は大きく揺れることは無い。

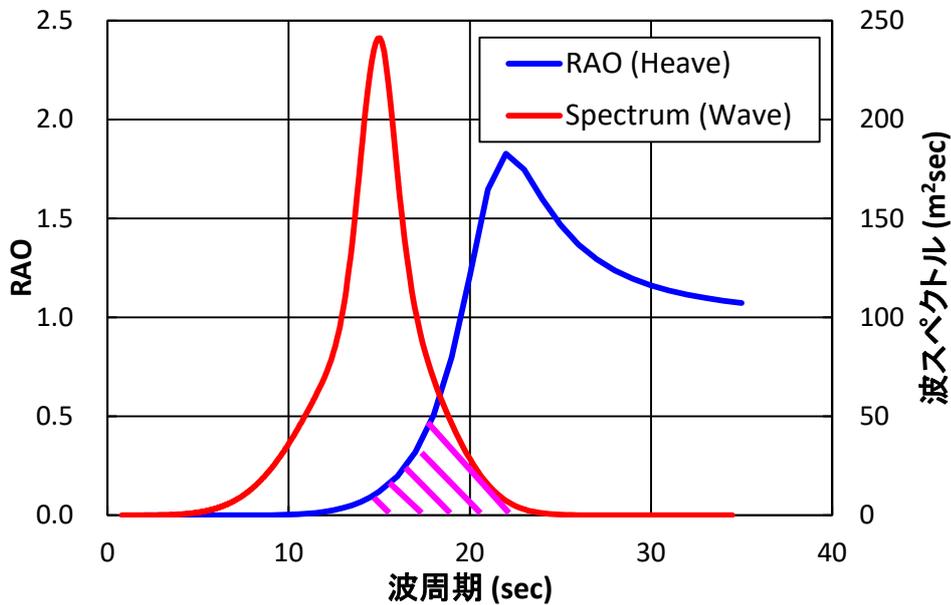


図 4.3.3 円柱の heave の RAO と波スペクトル

④ 動揺時系列と動揺スペクトル

浮体は、不規則波中において不規則に動揺する。不規則とは本書の範囲では変動の振幅が時間と共にランダムに変化することと考えてよい。ランダムに変化することとは不規則変動が確率的現象であることを示している。

図 4.3.4 に水槽で発生させた不規則波 (有義波高  $H_s=9.0m$ 、スペクトルピーク周期  $T_p=14.2sec$ 、縮尺 1/82、スペクトル型 JONSWAP) とその不規則波中に係留されたセミサブ浮体模型 (セミサブについては後述) の heave の時系列グラフ (時間を横軸に、浮体や水面の変位の時間変化を縦軸としたグラフ) の例を示す。グラフの値は実機 (実物) スケールに換算してある。縦軸のゼロは水面や浮体が波の無い時の位置にあることを示している。左のグラフは長時間の変動を示し、右のグラフは時間方向に拡大したもので

## 第4章 海洋構造物に作用する荷重と応答

ある。

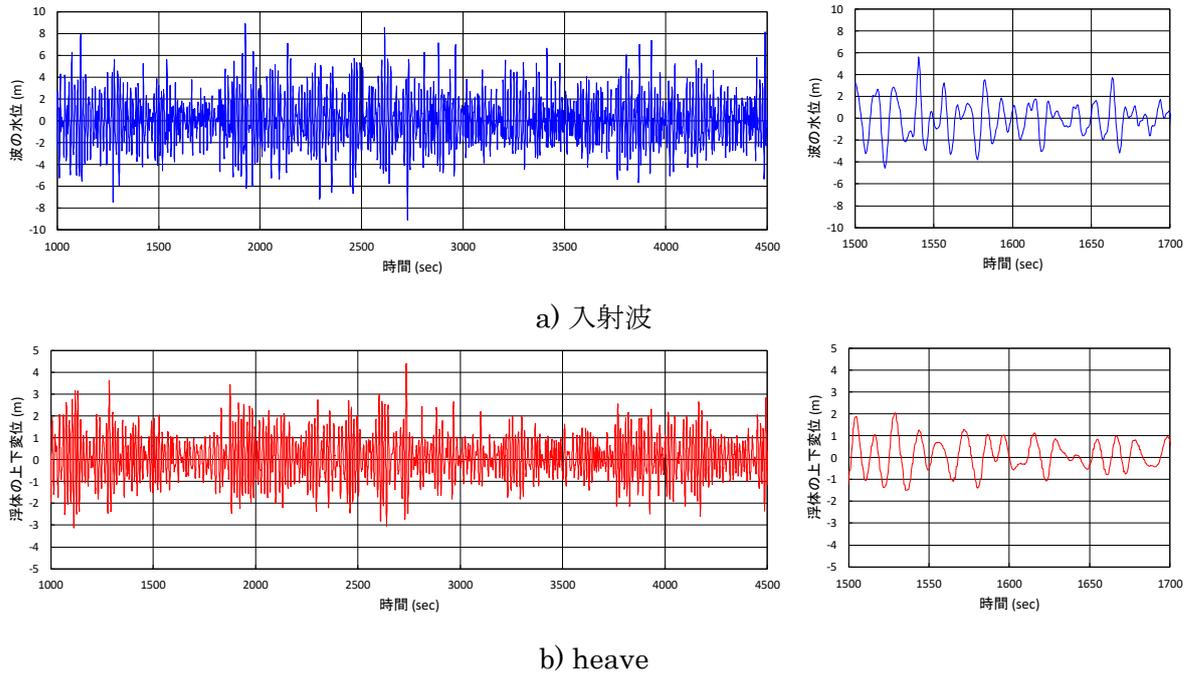


図 4.3.4 入射波と浮体 heave の時系列の例

時系列を観察することは動揺解析を理解する第一歩である。先ず、振幅が変動している様子を観察してもらいたい。総体としてプラス側とマイナス側がほぼ同等に変動しており、平均値はほぼゼロ（無限時間の平均はゼロに等しい）である。極値（ここでは変動の山と谷の距離）分布は前章 3.2.1(3)④のレイリー分布に従う。これが、線形過程と呼ばれる変動の特徴である。時系列の平均は次式で表される。

$$\bar{x} = \frac{1}{(t_2 - t_1)} \int_{t_1}^{t_2} x(t) dt \quad (4.3.9)$$

$x$  は任意の変動量、 $t_1$  は平均を求める開始時刻、 $t_2$  は平均を求める終了時刻である。変動の標準偏差  $\sigma$  は次式で表され、変動の大きさを示す。

$$\sigma^2 = \frac{1}{(t_2 - t_1)} \int_{t_1}^{t_2} (x(t) - \bar{x})^2 dt \quad (4.3.10)$$

不規則変動を表現する指標にスペクトルがある。スペクトルは、注目する周波数における変動のパワー（エネルギー）を表している。スペクトルは時系列のフーリエ変換によって求めることができる。フーリエ変換は時間の関数と周波数の関数の間の変換演算である。

動揺の RAO の二乗に前章 3.2.1(3)④で示した波スペクトルをかけると動揺のスペクトルが得られる。波と同じように、動揺スペクトルが大きいことは不規則波中においてそ

## 第4章 海洋構造物に作用する荷重と応答

の周波数の動揺振幅が大きいことを示す。動揺スペクトルの周波数積分は動揺の標準偏差  $\sigma$  の二乗(分散) に等しい。

$$\sigma^2 = m_0 = \int_0^{\infty} S(f)df \quad (4.3.11)$$

ここで  $m_0$  はスペクトルのゼロ次モーメント (式 (3.2.12) 参照)、 $S$  は動揺のスペクトル、 $f$  は周波数である。

浮体の固有周波数と波のピーク周波数が近いと動揺スペクトルのピークは大きくなる。図 4.3.3 の例ではハッチング部分の面積が大きいと動揺が大きくなる。

### (2) 縦揺 (pitch) ・横揺 (roll)

#### ① 復原力モーメントと固有周期

細長い木の棒を水に立てることはできるだろうか。

木の棒を水面に立てることは不可能である。必ず倒れる。木の棒の重心が棒の長さ方向の中心にあり、水面から大きく上に出ているからである。棒が立つためには、立てた状態で棒の重心が低い位置にある必要がある。例えば、半径 1m、喫水 5m の円柱浮体が立つためには、円柱の底面から 2.55m よりも低い位置に重心がある必要がある。

前項で作った高さに比べて直径が十分に大きい円柱はどうだろうか。水に浮かべると静かに浮いている様子が観察されるはずである。円柱の端を上から押して手を離すとゆらゆらと揺れて、やがて揺れは止まる。

木の棒は roll および pitch に対して不安定であるが直径が高さに比べ十分に大きい円柱は安定であることが分かる。

浮体の転倒を防止する力が roll および pitch の復原力モーメントで、次式の復原力係数  $K$  の正負によって roll および pitch の安定・不安定が決まる。

$$K = \overline{GM} \cdot Mg \quad (4.3.12)$$

ここで、 $\overline{GM}$  はメタセンター高さ、 $M$  は浮体質量、 $g$  は重力加速度である。

メタセンター高さ  $\overline{GM}$  は浮体の重心から見たメタセンターの鉛直方向距離で、メタセンターが重心より高い位置にある場合は正、低い位置にある場合は負である。重心がメタセンターよりも低い位置にあれば浮体は転倒に対して安定、高い位置にあると不安定となる。

円柱浮体は何らかの外乱を受けて傾斜した状態を図 4.3.5 に示す。作図の便宜上、水面を傾けている。直立状態では浮力と重力が釣り合っている (直立状態の重力は図示していない)。没水部分の体積中心を浮心と呼ぶ。浮力は浮体の没水部表面に作用する水圧の総和であるが見かけ上浮心に作用していると見なすことができる。浮体が傾斜すると

#### 第4章 海洋構造物に作用する荷重と応答

没水部の体積分布が変わり、傾斜した側に浮心が移動する。このため浮力と重力は作用線がずれて偶力となり、復原力モーメントが発生する。

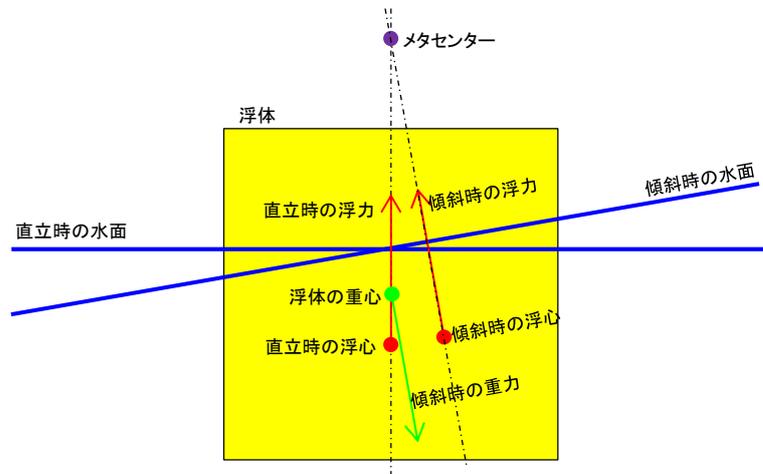


図 4.3.5 メタセンター

メタセンターは浮体の直立時の浮力の作用線と傾斜時の浮力の作用線の交点である。任意の形状の浮体では、傾斜につれて作用線の交点は移動するので、傾斜ゼロ（直立状態）の極限位置をメタセンターとする。極限位置と表現しているのは傾斜ゼロの時は作用線が一致して交点が不定になるからである。メタセンター高さ $\overline{GM}$ は浮心とメタセンターの距離 $\overline{BM}$ を用いて算出する。

$$\overline{GM} = \overline{BM} + \overline{KB} - \overline{KG} \quad (4.3.13)$$

$\overline{KB}$ は浮体底面（ $K$ は keel の意味）から浮心までの距離、 $\overline{KG}$ は浮体底面から重心までの距離である。

$\overline{BM}$ は浮体の傾斜につれて移動する浮心の軌跡曲線の傾斜ゼロにおける曲率半径であり、次式で表される。

$$\overline{BM} = \frac{I}{V} \quad (4.3.14)$$

$I$ は浮面心（水線面の面積中心）を通り傾斜軸に平行な軸周りの水線面二次モーメント、 $V$ は浮体没水部の体積（排水容積）である。

傾斜軸方向を  $x$ 、直角方向を  $y$  とすると、水線面二次モーメントは次式で定義される。積分範囲は水線面である。

$$I = \int y^2 dS \quad (4.3.15)$$

$dS$ は水線面上の微小面積要素、 $y$ は微小面積要素の軸からの距離である。

#### 第4章 海洋構造物に作用する荷重と応答

前述の「円柱浮体が直立できる重心高さの上限」は $\overline{GM} = 0$ として求めている。

喫水を一定として円柱の直径を変えた場合に円柱が直立することができる円柱底面からの重心高さの上限を図4.3.6に示す。円柱の断面が広がると、円柱浮体は安定し、重心高さの上限が上がっていくことが分かる。

$\overline{GM}$ は重心が低い場合、水線面積が大きい場合、図4.3.7の多列円柱の間隔が広い場合、浮体の没水（排水）容積が小さい場合等に大きくなる。

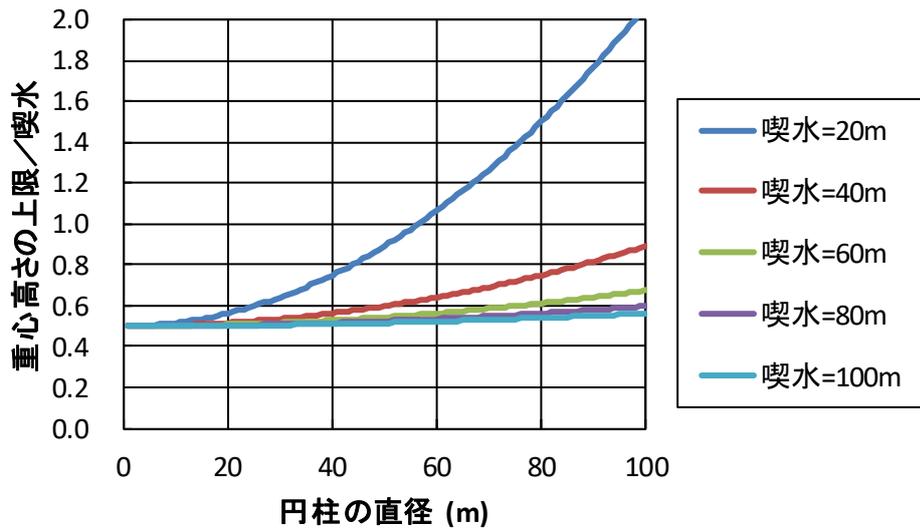


図 4.3.6 円柱浮体の重心高さ上限

Roll および pitch の固有周期は次式で与えられる。この式から $\overline{GM}$ が小さく慣性モーメントが大きいと固有周期は長くなることが判る。

$$T_n = 2\pi\sqrt{C_m I / K} = 2\pi\sqrt{\frac{C_m \kappa^2}{\overline{GM} g}} \quad (4.3.16)$$

ここで、 $I$ : 浮体の慣性モーメント、 $\kappa$ : 浮体の慣動半径。

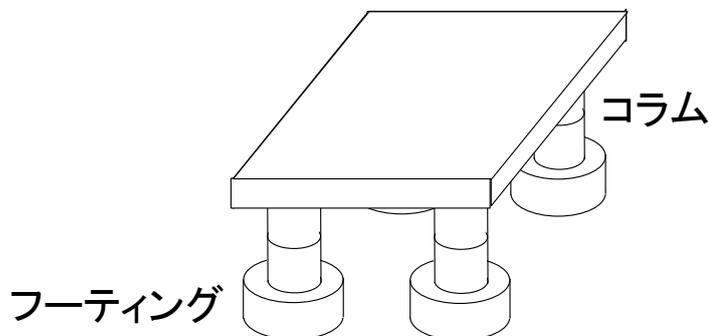


図 4.3.7 多列円柱浮体

## 第4章 海洋構造物に作用する荷重と応答

### ② 波強制力と応答関数

Roll および pitch の波強制力は主に浮体底面における波圧の空間的変動によって生じる。例えば、波上側で波圧が高く、波下側で波圧が低い場合には浮体を波下側に傾斜させるモーメントが働く。

周波数がゼロ（周期・波長が無限大）の極限では、反射波が無くなり、浮体底面における入射波圧の空間分布が一様に漸近するため、roll および pitch の Froude-Krylov 力はゼロに漸近し、波強制力も動揺の RAO もゼロに漸近する。

周波数無限大の極限では波数  $k$  が無限大となるので動揺の RAO はやはりゼロに漸近する。一般に roll および pitch の造波減衰は大きくないので、固有周波数近傍で動揺の RAO は高いピークを示す。

### (3) 前後揺 (surge) ・左右揺 (sway) ・船首揺 (yaw)

#### ① 復原力係数と固有周期

Surge、sway および yaw は heave、roll、pitch とは異なり、水面に対して平行な運動である。このような運動を水平面内運動と呼び、水面下の形状が変化しないために周囲の海水から復原力（元の位置に戻す力）を受けない。このため、浮体の位置を保つために位置保持装置が必要である。応答関数を求める時の復原力係数には、風や流れによる定常的な変位点における変位に対する係留力傾斜を用いる。一般に係留装置の復原力係数は浮体規模に比較して小さく、水平面内運動の固有周期は長い。セミサブ浮体で 120sec~60sec、長い場合は 300sec 近い浮体もある。

#### ② 波強制力に対応する応答関数

入射波の周期が極めて長い場合、波圧は静水圧に漸近するので、surge および sway の波強制力は浮体の波上側と波下側の水位差に比例する。水位差は波傾斜に比例するので、surge および sway の波強制力はゼロに漸近し、応答関数もゼロに漸近する。入射波の周期が極めて短い場合も応答関数の性質上、ゼロに漸近する。

水平面内運動に対する減衰力は小さいので、応答関数のピークは極めて高くなる。しかしながら、固有周期が前述のように、不規則波の周期帯を超えて極めて長い場合実際には、波強制力による同調現象は発生しない。

#### ③ 波漂流力

波強制力の大きさは波の高さに比例するが、波漂流力 (drifting force) は波の高さの二乗に比例する力である。定常成分を含むため、そこが注目されて波漂流力と呼ばれている。波はエネルギーと運動量を伝搬するが、浮体が波を反射すると運動量も反射されてその反力として力が働くとされている。

規則波中で、波漂流力は定常波漂流力として観測される。規則波は水位変動が余弦関数で与えられる。余弦関数の二乗は三角関数の加法定理により定常項と倍周波数項に分

#### 第4章 海洋構造物に作用する荷重と応答

離される。この定常項が定常波漂流力として浮体に作用する。

$$\zeta(t)^2 = (\zeta_a \cos \omega t)^2 = \frac{1}{2} \zeta_a^2 (1 + \cos 2\omega t) \quad (4.3.17)$$

ここで、 $\zeta$ ：波の瞬時値、時系列、 $\zeta_a$ ：波振幅、 $\omega$ ：入射波の円周波数である。

漂流力の比例係数は構造物の形状、状態（浮いているか固定されているか）、波周波数によって変化する。波周波数が高い（波周期が短い）場合、浮体が波をよく反射するので比例定数は大きく、波周波数が低い（波周期が長い）場合は波の透過量が大きくなるので比例定数は小さくなる傾向を示す。

異なる二つの周波数の規則波が重なっている波を二成分波、各周波数の規則波を成分波と呼ぶ。二成分波中で波漂流力は各成分波の周波数の差の周波数で変動する。これは異なる二つの周波数の余弦関数の和の二乗はやはり三角関数の加法定理により差の周波数の三角関数項と和の周波数の三角関数項及び定常項に分離されることに相当する。

不規則波は多数の成分波で構成されていると見なすことができる。これに加法定理を適用すると、低周波数（長周期）成分（定常成分を含む）と高周波数成分に分離される。波漂流力も長周期成分と高周波成分に分かれる。この長周期成分が水平面内運動の固有周期と同調して大振幅長周期の運動を生じる。これを長周期運動（slow drift motion）と呼ぶ。一方、高周波数成分は水平面内運動の固有周波数に比べ極めて高周波数側にあるため運動（動揺）として観測されることはない。

単位振幅成分波の二つの周波数が与えられた時に波漂流力の差の周波数項の振幅と位相が決まる。この振幅を2倍としたものはQTF（Quadratic Transfer Function：2次伝達関数）と呼ばれ、2成分波に対する波漂流力の応答関数（振幅と位相がセットになっている）である。縦軸と横軸を成分波の円周波数、鉛直軸を振幅とした場合のQTFの振幅の鳥瞰図（箱形浮体）の例を図4.3.8に示す。

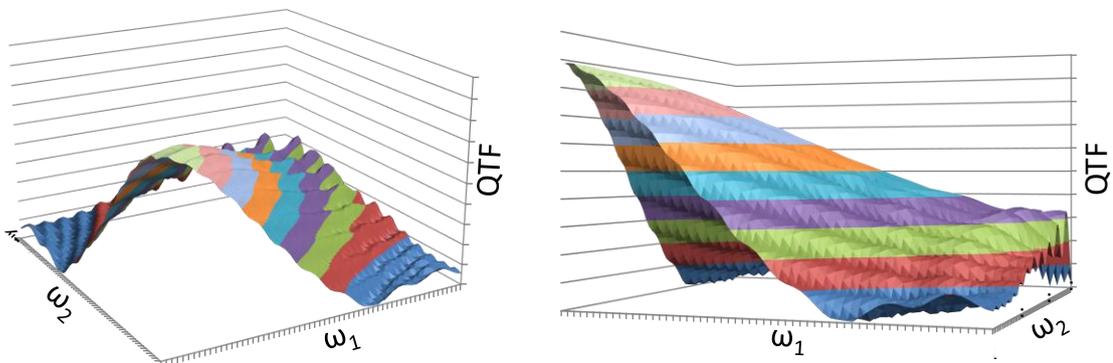


図 4.3.8 QTF 鳥瞰図（箱形浮体）

## 第4章 海洋構造物に作用する荷重と応答

図 4.3.8 左図は  $\omega_1 = \omega_2 = 0$  側から  $\omega_1 = \omega_2$  の線に沿って観たもの、図 4.3.8 右図はその直角方向から観たものである。

一番高い尾根線 ( $\omega_1 = \omega_2$  の線) が定常漂流力に相当し、差の周波数が大きくなると尾根線から直角方向に離れていき、振幅も小さくなる。QTF を用いて計算された不規則波中波漂流力の時系列の例を図 4.3.9 に示す。

山が尖り、谷が浅くなった形をしており、非線形過程と呼ばれる時系列の典型例となっている。QTF の定常項の  $1/2$  と波スペクトルの積を周波数に対して積分した値は波漂流力の平均値と一致する。

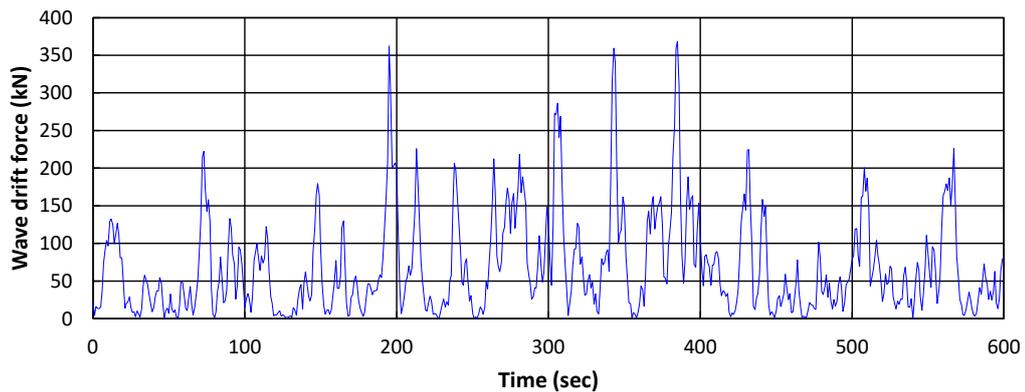


図 4.3.9 不規則波中波漂流力の時系列 (箱形浮体)

$\omega_1$ 、 $\omega_2$  平面上で差の周波数が一定となる線がある。この線上に沿って、QTF の振幅の二乗と  $\omega_1$  の波スペクトル、 $\omega_2$  の波スペクトルの積を積分した値は差の周波数に対する変動漂流力のスペクトルと見なすことができる。

### ④ 長周期運動

不規則波中の水平面内運動は長周期運動と波周期運動の合成として観測される。図 4.3.10 に箱形浮体の水平面内運動の時系列の一例を示す。この時、浮体は線形のばねで係留されているとしたため、動揺の非線形性は弱くなっている。この時系列は浮体の規模が大きいため波周期運動が観測できないほど小さい。

なお、surge の動揺スペクトルは外力に対する RAO (単位は[m/N]) の二乗に波漂流力スペクトルを乗ずることで得られる。

## 第4章 海洋構造物に作用する荷重と応答

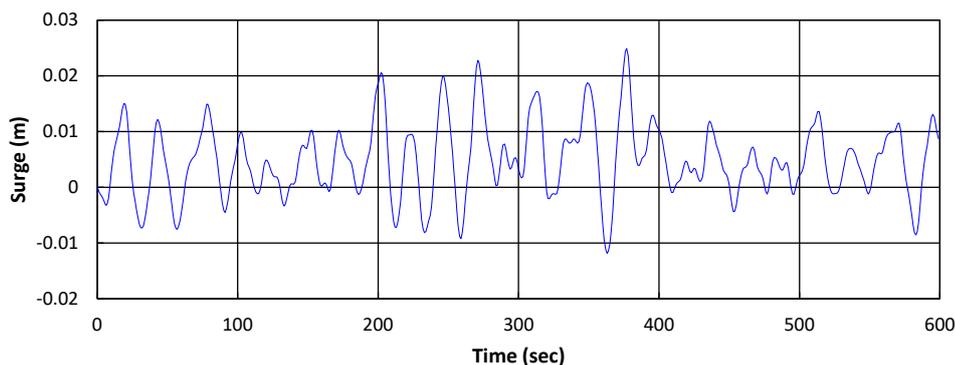


図 4.3.10 箱形浮体の surge の時系列例

### 4.3.2 揺れにくい浮体

前述のように木片が波に乗って波振幅とほぼ同じ振幅で上下に揺れる理由は、木片の **heave** の固有周波数が波周波数に比べ極めて高いからである。船は、規模が大きくなると一般に喫水も深くなるので、大きな船は固有周波数が低く、木片に比べれば揺れにくくなる。また、浮体規模が入射波の波長よりも大きくなると、波圧が時間のみならず空間的にも変動するようになり、波圧の空間積分である波強制力は相対的に小さくなる。海上空港のように水平規模が極めて大きくなると、全体としての **heave** は小さくなるが、浮体の弾性体としての性質が表れ、浮体が波打つようになる。弾性体としての浮体を扱うには流力弾性の手法を扱う必要があるので、ここでは剛体として扱うことができる規模を想定する。式 (3.2.2) において水深を無限大とすると  $\tanh(kh)$  は 1 に漸近する。これを式 (3.2.3) に代入して波長と周期の関係を求めると、周期 15sec の深海波の波長はおよそ  $L=351m$  となる。浮体の型深さにもよるが、およそ 200m 以下の規模の浮体を想像してもらいたい。

木片と船の揺れ方の違いから判るように、浮体の動揺の固有周波数は入射波周波数よりも低周波側に設定するのが基本となる。

不規則波は波高が高くなるとピーク周期が長くなる傾向を持つ。浮体の設計は、設置海域における 100 年再現波高 (3.3.2(2)参照) 等の高い波高を想定するため、不規則波のスペクトルピーク周期も長い側を考慮する必要がある。外洋の荒れた海象で 15sec~20sec が一つの目安である。

より積極的に浮体の動揺を抑える方法の一つとして、波のスペクトルピーク周波数と動揺の固有周波数をできるだけ離す、すなわち、動揺の固有周期をより長くする方法がある。例えば、円柱形状の浮体の **heave** の固有周期を 20sec にする場合、 $C_m=1.2$  と仮定すると、喫水は約 90m である。このような浮体として石油の生産施設や風力発電浮体等に使われている SPAR 型浮体がある。SPAR は大喫水の円柱または円筒型浮体で重心を低くすることで roll および pitch の安定性を確保している。近年では図 4.3.11 に示すようなトラス SPAR が主流となっている。これは、浮体の下方にトラス構造物でバラストタンク (浮体内部に海水を入れて重りにする) を設け、roll および pitch の慣性モーメントを増加させることで roll および pitch の固有周期の増大を図るものである。

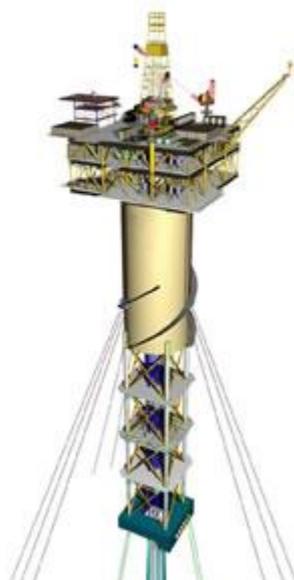


図 4.3.11 トラス SPAR

(出典：Technip 社ウェブサイト)

また、動揺抑制の別の方法として、ある特定の周波数（周期）帯の応答関数を小さくすることも考えられる。円柱の下端に球状の膨らみを持った形状は上下方向の波力が非常に小さくなる周波数が存在する。これを波無し周波数と呼び、このような特性を持つ形状を波無し形状と呼ぶ。この波無し周波数は円柱直径と膨らみの直径の比で決まる。波無し周波数では波力が非常に小さいため応答関数も極めて小さくなる。波なし形状と同じ原理を応用しているのが図 4.3.12 に示すセミサブ型浮体（semi-submersible type floating unit）である。

セミサブ型浮体はローワーハルと呼ばれる細長い没水体（通常は 2 本）の上に柱を建て、その上にデッキを乗せた形状をしている。セミサブの heave の RAO の例を図 4.3.13 に示す。周期 3sec 近傍に波無し点がある。これによって 2sec～3sec にかけて応答関数が抑制されている。この例での計算には剥離に伴う粘性減衰は考慮されていない。それは、波無し点で RAO がゼロになっていることから判る。粘性減衰を考慮するとこの計算例よりも RAO が波無し点では高く、同調点では低くなる。なお、図 4.3.13 は模型スケールで表示されている。

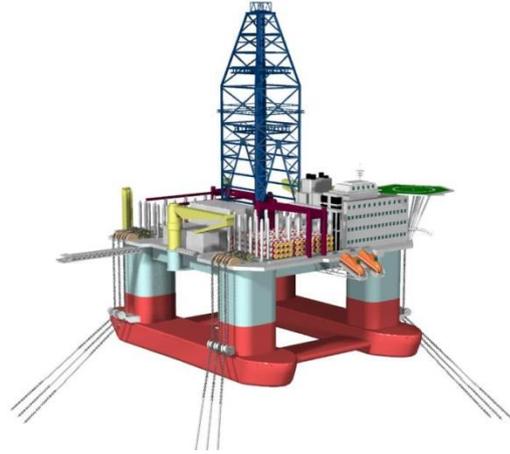


図 4.3.12 セミサブ型浮体

(出典：湯川ら (2011) )

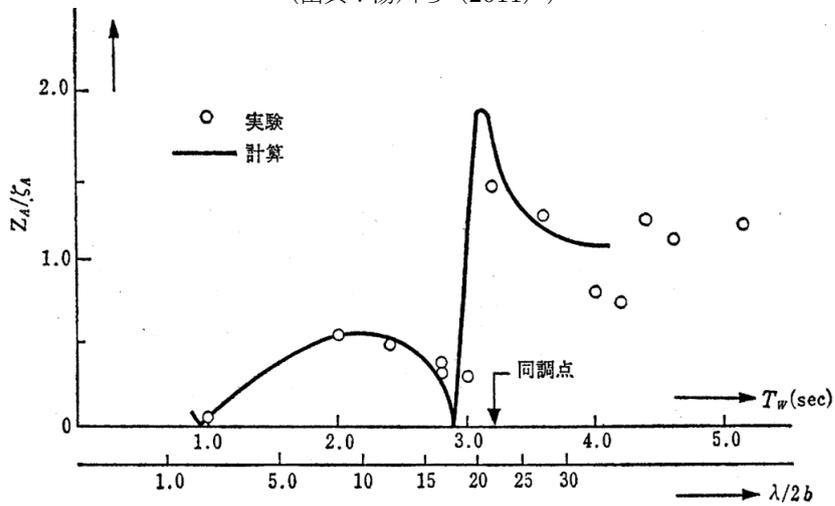


図 4.3.13 heave の RAO (セミサブ)

(出典：元良 (2010) )

### 4.3.3 時間領域解析

近年、浮体の動揺解析は時間領域解析が一般的となってきた。時間領域解析は運動方程式を時間に関して直接 2 階積分する方法である。この方法では波漂流力や係留力などの非線形現象を比較的厳密に扱うことができる。また、浮体、係留ライン、ライザー等の複数の要素を一体解析することが容易である。ただし、非線形性が強い対象については時間刻みを細かくする等の工夫が必要であり解析時間が膨大になる場合がある。

#### (1) 単独浮体の運動方程式

時間領域解析に於いても、微小振幅仮定に基づき運動方程式が構成される。放射状の係留ラインでの係留、すなわちスプレッドモアリング (spread mooring) された単独浮体の運動方程式を以下に示す。ここでスプレッドモアリングとしたのは、船首揺 (yaw) にも復原力を持たせるためである。

$$(I + I_{\infty})\ddot{X} + N(\dot{X}) + K(X) = F_{moor} + F_{wind} + F_{current} + F_{wave} \quad (4.3.18)$$

$X$ は浮体の6自由度 (surge, sway, heave, roll, pitch, yaw) の変位ベクトルで時間の関数、 $F$ は係留、風、潮流、波による6自由度の外力ベクトル、 $K$ は復原力ベクトルで $X$ の関数、 $N$ は減衰力ベクトルで速度ベクトル $\dot{X}$ の関数、 $I$ は慣性マトリックス、 $I_{\infty}$ は付加慣性マトリックスである。

本方程式は微小振幅仮定に基づくため、定常外力と係留力・復原力の釣り合い位置 (6自由度) 周りの微小振動として記述される。大きく揺れる場合であっても微小振動の延長として扱う。計算座標系の原点は釣り合い位置における浮体固定座標系の原点に一致させる。

付加慣性マトリックス、減衰力ベクトルの造波減衰項、波浪外力ベクトルは通常ポテンシャル理論に基づき算出されるが、浮体固定座標系原点をモーメント中心とする必要がある。風の外力モーメント、流れの外力モーメントも同様である。浮体固定座標系原点と浮体の重心が異なる場合は慣性マトリックスを補正する必要がある。

減衰力ベクトルは造波減衰項と粘性減衰項に分かれる。造波減衰項は変位に比例し、粘性減衰項は変位の二乗に比例すると考えて良い。

付加慣性 (付加質量と付加慣性モーメントの総称) と造波減衰係数はそれぞれ慣性力と減衰力の加速度・速度に対する比例係数であるが、力の方向と運動の方向の組合せで $6 \times 6$ マトリックスを形成する。

付加慣性マトリックスの各要素には周波数の関数である付加慣性の周波数無限大の漸近値を用いる。周波数の関数である造波減衰係数のフーリエ逆変換をメモリー影響関数と呼ぶ。フーリエ変換およびフーリエ逆変換は時間の関数と周波数の関数の間の変換演算である。速度の時系列の時間を逆転させメモリー影響関数と重畳積分させたものが時間領域の造波減衰力である。これは2個の関数 (造波減衰係数と速度のフーリエ係数) の積のフーリエ逆変換に相当する。速度時系列の過去の値と重畳積分するためメモリー影響関数と呼ばれる。周波数領域で付加慣性と造波減衰は余弦関数と正弦関数の関係にあり、 $I_{\infty}$ はフーリエ逆変換の残余項と考えると良い。

Heave、roll、pitchの復原力係数は通常定数として扱われる。浮体が船型の場合 heave と pitch の連成項が生じる。

風の外力、流れの外力は本来変動力であるが、風速・流速の二乗に比例する定常力として扱われることが多い。比例係数 (抗力係数、モーメント係数) は浮体と速度との相対方位の関数で与えられる。通常、抗力係数・モーメント係数は風洞試験や曳航試験によって求められるが、浮体形状を単純な形状の要素に分解して積算して求める方法もある。

波強制力および波漂流力も波の伝搬方向と浮体の相対方位の関数として与えられる。

## (2) 係留力

前項の運動方程式では係留力は外力に分類して右辺に配置したが、浮体の変位・速度・加速度の関数として与えられることから左辺に配置しても違和感はない。係留された浮体

## 第4章 海洋構造物に作用する荷重と応答

の解析を浮体と係留ラインの多体問題と考えることもできる。

係留装置は基本的に係留ライン（鎖、ワイヤーロープ、合成繊維ロープ等）で構成される。浮体の動揺解析上で必要なのは上端の張力であるが、上端張力を計算するにはラインに沿った張力分布とラインの形状（垂れ下がりの形状）を計算する必要がある。計算手法はランプドマス法と有限要素法に大別される。何れもラインを線状の連続体と見なし、要素に分割する。ランプドマス法は分割要素を質点（質量を持った球）と見なし、質点間をバネで接続しているとしてモデル化する。有限要素法は分割要素自体を曲げと伸びと捻りが可能な弾性体としてモデル化する。何れも準静的計算と動的計算が可能である。

浮体側から見ると係留ラインによって動揺が押さえ込まれている状態であるが、係留ラインから見ると浮体によって上端を上下、前後、左右に揺すられている状態となる。

準静的計算とは上端を揺する速度および加速度をゼロの極限としたものである。動的計算では上端張力に係留ラインの慣性力と流体の抗力の影響が入るため、準静的計算の上端張力よりも張力変動が大きくなる。

係留の動的計算を用いて運動方程式を解く場合、浮体の運動と上端張力の間で繰り返し計算を行う必要がある。

### (3) 多体問題

多体問題とは2隻以上の浮体がお互いの影響を無視できない距離にあり、お互いの干渉を考慮する必要がある場合の問題（状態）を指す。典型的な例は図4.3.14に示すようなFPSO等からシャトルタンカーへ石油・ガスを移送（払い出し）する際の2浮体問題がある。



(a) Tandem



(b) Side by side

図4.3.14 FPSO・FSOからシャトル船への石油の払い出し

(出典：(a):Bluewater社ウェブサイト、(b):Gazprom社ウェブサイト)

図4.3.14左図に示すようなFPSOとシャトルタンカーとが直列（tandem係船）の場合では、FPSOとシャトルタンカーとは1本のホーサー（ロープ）で繋がれていて、十分な

## 第4章 海洋構造物に作用する荷重と応答

距離を空ける。そのため、お互いの影響はさほど大きくない。

一方、図 4.3.14 右図のような FPSO とシャトルタンカーとが横付け (side by side) している場合では、FPSO とシャトルタンカーとは船首と船尾の 2 カ所をホーサー (ロープ) によって係留し、さらに両浮体の間に空気フェンダーを挟み浮体同士が衝突しないようにしている。この状態が釣り合い状態で、フェンダーが圧縮されてフェンダーの反発力とホーサーの張力が釣り合っている。お互いの運動はホーサー、フェンダー、海水 (付加質量、造波減衰、反射波) を通して影響し合っている。

運動方程式はそれぞれの船体の浮体固定座標系原点周りの微小動揺を未知数として立てられる。未知数は 2 船分で 12 自由度であり、方程式の数も 12 本となる。付加慣性、造波減衰係数は  $12 \times 12$  マトリックスとなる。FPSO の heave によってシャトル船に作用する heave 方向の力やシャトル船の sway によって FPSO に作用する roll 方向の力等が含まれる。これらには負の減衰もあり得る。

また、外力としてホーサー張力、フェンダー反力を考慮する必要がある。風の外力や流れの外力については、FPSO とシャトル船のお互いの遮蔽影響を考慮すると解析精度が向上する。波浪外力については 2 船体を同時に解く必要がある。

### 4.3.4 安全性・稼働性の評価

浮体の動揺解析の目的は浮体の安全性や稼働性を評価することにある。海洋構造物の安全性の評価方法は各国の船級協会 (classification society: 日本海事協会、DNV-GL (ノルウェー・ドイツ)、ABS (米国) 等) や国際標準化機構 (ISO: International Organization for Standard)、米国石油協会 (API: American Petroleum Institute) 等がその手法を定めている。ここでは、それらを参考に係留装置の安全性評価手法について簡略化して説明する。また、稼働性についてもその考え方を説明する。

#### (1) 安全性・稼働性の考え方

安全性評価とは、設計した海洋構造物が設置海域で耐用期間内に壊れないことを確認する作業である。構造物が壊れる状況は二通り存在する。過大な荷重がかかって部材が一気に引きちぎられる状況と繰り返し荷重により部材に疲労が蓄積し最終的に破壊に至る状況である。前者の状況を終局限界、後者を疲労限界と呼ぶ。装置の一部が破損している状況を独立に限界状態とする考え方もあるがここでは、上記の 2 状況を考える。

安全性評価では、先ず評価のための自然環境条件が決められる。終局限界状態の解析を行うための最も厳しい環境条件、疲労限界状態の解析を行うための波高や風速毎の出現頻度である。データは設置海域又は近傍の観測データを用いるが、海洋構造物の用途や使用方法によって自然環境条件を算出する再現期間が異なる。台風の時に退避できるのであれば短い再現期間、退避できなければ長い再現期間、設置期間が短い場合や人が常駐しない場合は短い再現期間という具合である。常設の海洋構造物で人が常駐する場合、一般に再現期間は 100 年とされるが、近年は再現期間を更に長くする傾向がある。

## 第4章 海洋構造物に作用する荷重と応答

以下、係留ラインの安全性評価を説明する。

終局限界状態の評価は、設定した環境条件での評価時間内の係留ラインの最大張力を推定し、ラインの材料の最小破断荷重との比（安全率）が許容値を超えていないことを確認する。最小破断荷重（MBL：Minimum Breaking Load）は部材の材料の種類毎に規格として定められている。安全率の許容値は解析手法や構造物の状態によって異なる値が用いられる。例えば、全ての係留ラインが健全な状態で動的解析手法を用いた場合、安全率の許容値は1.67とするのが一般的である。

疲労被害は繰り返しの荷重レベルと繰り返し回数で決まる。出現頻度を決めた環境条件毎に荷重レベルと繰り返し回数を求めて、T-N 曲線と呼ばれる材料固有の疲労被害関係式を用いて、その環境条件が1年間途切れなく続いた場合の疲労被害度を求める。

T-N 曲線の T は張力、N は繰り返し回数のことを指し、ある張力振幅で繰り返し荷重をかけた時何回で破断するかを示した材料固有の特性である。現状、T-N 曲線は実験によって求められる。また、張力だけがかかった場合に比べ曲げが加わった場合係留ラインは破壊しやすくなる。環境条件毎の年間疲労被害度は張力時系列をレインフロー法等の手法で求められるが、手法の詳細な解説は他の書籍を参考にされたい。

年間疲労被害度は環境条件毎の年間疲労被害度と出現頻度の率を乗じて合算して求める。年間疲労被害度の逆数が疲労寿命である。一般に疲労寿命の許容値は耐用年数の10倍以上とされる。

稼働性の評価は、環境条件毎に roll 振幅や上下加速度の最大値や平均値を指標として求め、許容値と比較して作業可能かどうかを判定する。作業可能と判定された環境条件の頻度を合算して年間の頻度率を算出する。これが稼働率である。指標や稼働率の許容値は事業の利益率に直結するため公的に定めた値は存在しない。

### (2) heave、roll、pitch の動揺振幅の有義値（significant value）・最大値の予測

heave や roll、pitch の動揺振幅の有義値については、時間領域解析によって時系列が得られれば統計解析によって求めることができる。また、周波数領域解析によりスペクトルが得られれば波高の有義値（式(3.2.13)）と同様にスペクトルの周波数積分値の平方根の4倍として求められる。

最大値については確率論的にのみ求めることが可能である。時間領域解析で得られた時系列の最大値は1つのサンプルであり、理論的には無限の値まで発生する確率はゼロにならない。そこで、決められた評価時間（3時間を用いるのが一般的）の時系列を N 系列用意した時に得られる N 個の最大値サンプルを基に、発生確率が最も高い最大値の値を最大値の推定値とすることが一般的である。この値を MPM（Most Provable Maximum）という。元の時系列の極値分布がレイリー分布に従う場合、即ち、線形過程の場合、MPM は次式で与えられる。

$$MPM = \sigma \sqrt{2 \ln \left( \frac{T_e}{T_z} \right)} \quad (4.3.19)$$

## 第4章 海洋構造物に作用する荷重と応答

ここで、 $\sigma$ は動揺量の標準偏差（式（4.3.10）もしくは式（4.3.11））、 $T_e$ は評価時間、 $T_z$ はゼロクロス平均周期（式（3.2.13））である。

$\sigma$ と $T_z$ は動揺のスペクトルから求めることができるので、波スペクトルと応答関数があればMPMが求められる。

### (3) 水平面内運動の最大値

水平面内運動は長周期運動と波周期運動の合成で与えられ、運動のスペクトルは2つのピークを持つ。このようなスペクトルを示す系を広帯域過程と呼ぶ。この場合、最大値の推定に式（4.3.19）のMPMは直接適用できない。任意の広帯域過程Xの最大値の推定方法としてしばしば用いられるのが次式である。

広帯域過程を長周期成分と短周期成分に分離する。水平面内運動は元々長周期運動と波周期運動の合成なので分離も可能である。

$$\begin{aligned} X_{max1} &= X_{mean} + X_{Lmax} + X_{Hsig} \\ X_{max2} &= X_{mean} + X_{Hmax} + X_{Lsig} \\ X_{max} &= \text{Max}(X_{max1}, X_{max2}) \end{aligned} \quad (4.3.20)$$

ここで、 $X_{mean}$ ：平均値、 $X_{Lmax}$ ：長周期成分の最大値、 $X_{Hmax}$ ：短周期成分の最大値、 $X_{Lsig}$ ：長周期成分の有義値、 $X_{Hsig}$ ：短周期成分の有義値、 $\text{Max}( , )$ ：変数の内の最大値を選ぶ関数である。

波高は水位変動の谷と山の高低差（両振幅と言う）を指す。一方、最大変位を推定する場合の有義値は平均値からの変位量（片振幅と言う）を指す。このため、有義波高は波の標準偏差の4倍であり、最大変位の推定のための有義値は変動の標準偏差の2倍である。

長周期運動の非線形性が強くない場合、近似的にレイリー分布に従うとして式（4.3.19）から求めたMPMを長周期成分の最大値とみなすことができる。波周期運動は基本的にレイリー分布に従うとみなすことができる。

長周期成分の非線形性が強い場合は式（4.3.19）を長周期成分の最大値とすることは出来ない。近年では、計算機が発達したこともあり、式（4.3.20）を用いず、複数回の時間領域解析から直接最大値サンプルを求め、統計処理によりMPMを求めることを要求する船級協会が増えている。要求される解析回数は船級協会によって異なるが10～30回程度である。

### (4) 係留ライン張力の最大値

係留ラインの最大値を簡易的に求める方法として、水平面内運動の最大変位点における準静的計算結果を採用する方法がある。

最も精度の高い方法としては、時間領域解析により直接張力時系列を計算し、最大値サン

## 第4章 海洋構造物に作用する荷重と応答

プルを複数個求めて統計処理により MPM を求める方法がある。

### (5) 最大値サンプルの統計処理

最大値サンプルから、MPM を求める方法としては、最大値サンプルのヒストグラムを作り最も頻度の高いランクの中央値を採る方法が先ず考えられる。しかし、高々30個程度のサンプルを用いてこの方法を採用した場合、分解能も精度も粗すぎるものとなる。このような場合有効な方法は順序統計を用いる方法である。

順序統計とは、N 個のサンプルを大きい方から降順に並べ、1 から順に番号をふり、番号を N+1 で除した値（仮に番号比と呼ぼう）を求めた時、降順に並べたサンプルと番号比のセットのことをいう。番号比は最大値が対応するサンプル値を超える確率（超過確率）に相当する。超過確率は確率密度関数（ヒストグラムに相当する）の定積分を 1 から差し引いた値である。順序統計を Weibull 分布等の分布関数にフィッティングすることで MPM を算出する。この方法では、ヒストグラムを使うよりも遙かに高精度に MPM の推定が可能である。ただし、番号比の計算方法には N+1 を使う以外にも幾つか提案されている。

### (6) 外力方向の組合せ

3章にて記載したように波（風浪）は風によって発達するため、風と風浪は同じ方向から入射する場合が多い。一方、うねりについては、風向と異なる場合がある。

流れは潮流と海流では発生原因が異なるものの、浮体構造物にとっては同じ「流れ」であるため、特に取り扱いを変えることはなく、また流れの方向も動揺解析を行う 3 時間程度であれば、流向一定として扱うことが多い。

浮体構造物を設置する海域の風、波、流れの方向の発生頻度については表 3.2.1 に示したような度数分布表および再現期間の考え方 (3.3.2(2)) を元に、安全性評価に用いる組合せを設定する。なお、発生頻度の情報が乏しい場合、係留システムにとって最も厳しい方向の組合せで解析することが求められる。厳しい方向が事前に判らなければあらゆる方向で解析する必要がある。ただし、設置海域の方向頻度の情報が乏しい場合に解析すべき方向の組合せを指定している船級協会もある。

スプレッドムアリングされたセミサブや SPAR と、タレット係留 (turret mooring) の船型浮体では厳しい方向の組合せが異なる。SPAR の場合、明らかに一本の係留ラインの方向から風、波、流れが集中して入射する場合が最も厳しい。一方、船型のタレット係留では、方向が少しばらけた方が最も厳しいものとなる。

## 4.4 構造応答解析

動揺解析は基本的に海洋構造物を変形しない剛体として扱うのに対して、構造応答解析は海洋構造物を弾性体の部材の集合体と考え、構造物の変形と応力を解析の対象とする。弾性体とは外力（荷重）が作用した時に変形する物体のことであり、応力とは荷重を受け持っている部

## 第4章 海洋構造物に作用する荷重と応答

材の面積で荷重を除した値である。例えば、1本の柱が構造物の重量を支えている場合、重量を柱の断面積で除した値が応力である。正確には、柱の上端と下端では柱の重量に相当する分の応力が異なる。本書の範囲では応力が部材の材質固有の許容値を超えると部材が破壊すると考えてよい。

### 4.4.1 要素部材の静解析

海洋構造物は幾何学的形状をした要素部材で構成されることが多い。要素部材は大きく棒・柱、梁、平板に分類される。棒・柱、梁は断面寸法に比べ長さが長い部材である。棒・柱は部材の長手方向の荷重（引っ張り荷重・圧縮荷重）を支える部材で、このうち鉛直荷重（基本的に圧縮）を支える部材を柱という。梁は長手方向（軸方向）に直角な方向の荷重を支える部材である。平板は主に面に平行な荷重を支える部材として扱われる。

#### (1) 柱

とっくり型の柱（ここでは構造物を柱に置き換えて考える）の上端にプラントを乗せた重力式の固定構造物がある。とっくり型となっている理由は海面近傍の構造物の直径を絞ることで波浪荷重を抑えることにある。



図 4.4.1 重力式固定構造物

(出典：ILTWMT 社ウェブサイト)

構造物の自重による応力の分布を考えよう。とっくり型の場合水圧が応力に影響を与えるので寸胴型とする。自重による応力を考慮する場合、柱の断面形状は問わない。中実丸棒でも円筒パイプでも角パイプでもよい。荷重  $F$  を断面積  $A$  で割った値が応力  $\sigma$  である。

$$\sigma = F/A \quad (4.4.1)$$

図 4.4.2 は柱の鉛直方向の応力分布を示したものである。縦軸は柱の鉛直方向位置、横軸は応力で、負の値は圧縮を示す。柱の自重が加わるため下に行くほど応力が高くなる。とっくり型とするもう一つの理由は、海底近傍で柱の自重を支えるため直径を増やす必要があ

## 第4章 海洋構造物に作用する荷重と応答

るからである。

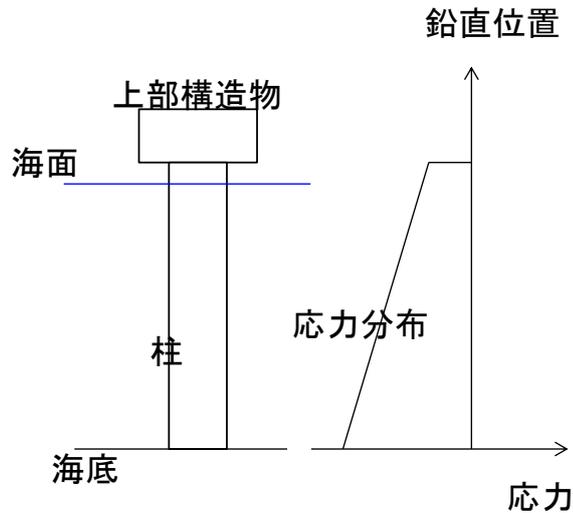


図 4.4.2 柱の応力分布

重力式構造物は通常コンクリートで作られる（コンクリートは鋼材に比べ圧縮に強い）が、鋼材の場合、応力  $\sigma$  の大きさと応力によって生じる歪み  $\varepsilon$  は比例関係にあり式 (4.4.2) で表される。ここで比例係数  $E$  を弾性係数と呼び、材質固有の値である。以降、簡単のために鋼材を想定することとする。

$$\sigma = E\varepsilon \quad (4.4.2)$$

歪みは部材の変形量と部材長さの比であるが、自重を考慮する場合は応力分布が一様で無いため全体歪みと局所歪みの値が異なる。局所歪みは部材の微小部分の長さとその部分の変形量の比である。

構造解析を行う場合、境界条件の設定が重要である。境界条件とは端部の状態のことで、変位、変角、力、モーメントがそれぞれ自由 (free) か固定 (fix) か等を決める。上記の例の場合、柱の上端は変位自由、力固定、下端は変位固定、力は自由（解析によって決定される）である。変角・モーメントは考慮していないが上端は共に自由、下端は固定である。

### (2) 棒・トラス

棒材は長手方向の荷重（引っ張り荷重または圧縮荷重）を支える。構造力学の教科書等では簡単のため自重を省略する場合が多い。

棒材の端部を接合して網目状に組んだ構造をトラスと呼び、橋桁やクレーンのアーム等に用いられている（図 4.4.3 参照）。実際の部材と部材の接点は剛に接合されるが、解析においては近似的に「ピン接合」と考える。ピン接合は境界条件の一種で、接点において部材間の相対変角が自由で相対変位が固定である。



図 4.4.3 トラス構造のクレーンアーム

(出典：九州観光推進機構ウェブサイト)

図 4.4.4 に示す水平の片持ちトラスの端部に鉛直荷重がかかった場合の端部の撓みと各部材の応力を求めることを考える。クレーンで荷物を吊り上げる場合の定格荷重を求める時等にこの解析を行う。線は部材、線の交点は接点である。左の垂直壁上の上の△は固定ピン支持、下の△は移動（ローラー等で移動可能と考える）ピン支持を表す。

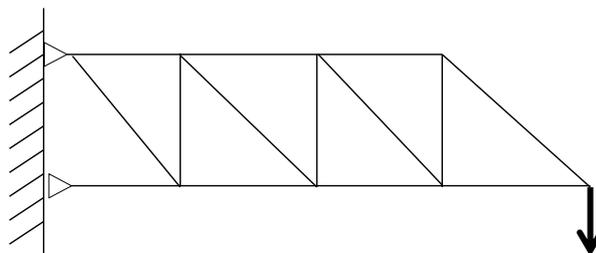


図 4.4.4 トラスの撓みと応力

各接点において力（外部荷重、支持点反力、部材張力・圧縮力）の釣り合い式を作り、連立方程式を解くことで部材応力を求めることができる。平面トラスなので力の方向は水平方向と鉛直方向の 2 方向あり、釣り合い式は接点数の 2 倍、存在する。撓みは応力から部材の変形を算出し「変位図」を作成して求める。

未知数（例えば接点反力と部材張力・圧縮力）の数と釣り合い式の数が一致しているトラスを静定トラス、未知数の数が釣り合い式よりも多いトラスを不静定トラスという。不静定トラスは釣り合い式からだけでは解くことが出来ないが、その解法は他書に譲ることとする。

(3) 梁

部材の長手方向と直角方向の荷重を支える部材を梁と呼ぶ。図 4.4.5 は梁を両端で支え、中央に集中荷重  $F$  をかけた時の反力と変形の様子を示している。左の端点は「ピン支持」、右の端点は「移動ピン支持」である。この場合梁は U 字形に曲がる。部材が曲がっている時、部材には曲げモーメント  $M$  が作用していて、曲げモーメントと曲げの曲率  $\gamma$  (部材に接する円の半径の逆数) は比例する。

$$M = EI \cdot \gamma \quad (4.4.3)$$

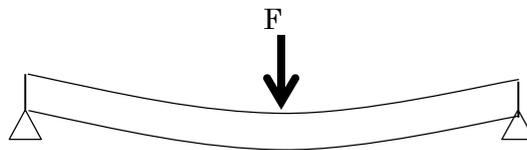


図 4.4.5 梁の変形

比例定数  $EI$  を曲げ剛性 (弾性係数に部材の断面 2 次モーメント  $I$  を乗じたもの) とい、部材の曲げにくさの度合いを示す。曲げ剛性は部材の断面形状に依存する。部材が曲げ方向に厚みを持つと曲げにくくなる。

部材断面の軸応力 (引張り応力・圧縮応力) 分布を図示すると図 4.4.6 ようになる。曲げの外側には引張り応力、内側には圧縮応力がかかっている。中立軸からの距離に軸応力をかけて断面を積分範囲として面積分すると曲げモーメントに等しくなる。

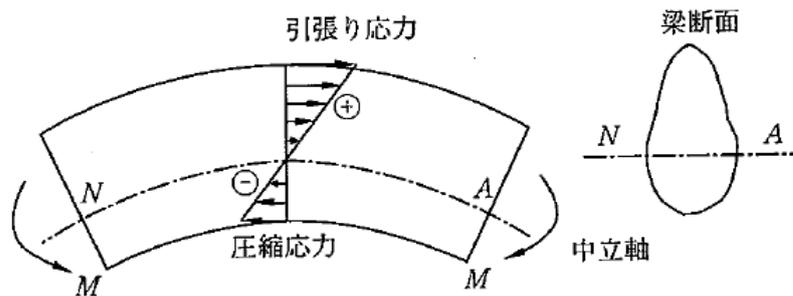


図 4.4.6 断面の軸力分布

(出典：吉田 (2010) )

図 4.4.7 に梁の長手軸上のモーメント分布の計算法を示す。梁に対する曲げモーメントは外部荷重と支持反力によって発生する。作用点がずれていて対向する力は部材にせん断力として作用し、曲げモーメントはせん断力の長手軸方向の積分によって求められる。また、梁の撓みは曲げモーメントの積分によって求められる。図 4.4.8 は部材の微小部分に作

## 第4章 海洋構造物に作用する荷重と応答

用するせん断力と曲げモーメントの模式図である。

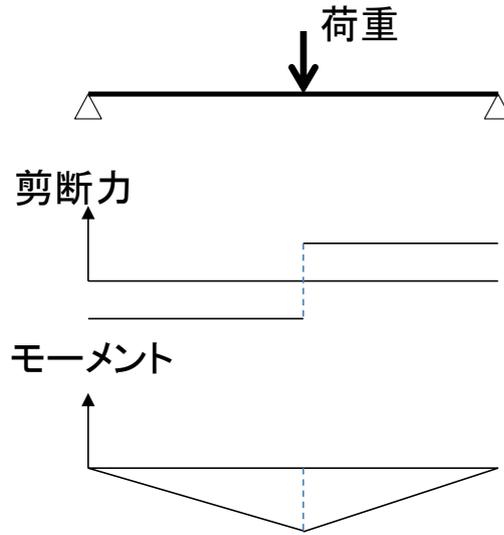


図 4.4.7 曲げモーメントの図式解法

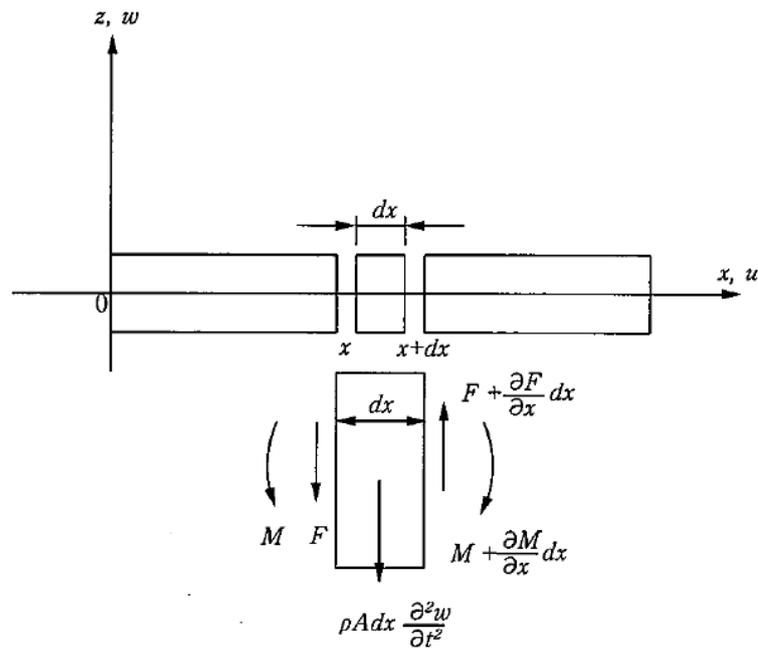


図 4.4.8 せん断力と曲げモーメントの模式図

(出典：吉田 (2010) )

### 4.4.2 海洋構造物の動的構造解析

構造物の構造応答も剛体の運動と同じように、外力の周波数帯と構造の固有周波数が近くなると同調現象が生じるため、動的解析が必要である。構造物は通常連続体とみなされ無限次元の自由度を持つ。その基礎となる運動方程式は時間と空間の偏微分方程式である。この

## 第4章 海洋構造物に作用する荷重と応答

方程式は、構造の微小部分の慣性力が波浪外力、流体力（付加慣性力や造波減衰力）、位置保持力及び隣り合う微小部分との相互作用としての内力と釣り合うとして導出する。内力には微小部分間の相対変位に依存する項と相対速度に依存する項がある。前者は部材の剛性に相当し後者は構造減衰力に相当する。構造解析においても、通常、微小振幅仮定による方程式の線形化が行われる。

### (1) 変動集中荷重による梁の振動

船舶は内部の構造は複雑であるが、細長い外形をしており大局的には1本の梁とみなすことができる。ここでは、梁上の一点に上下の加振力が加わる場合を考えよう。このような状況は船舶のエンジンが機関室で振動している場合などが考えられる。簡単のため自重による撓みはないものとする。

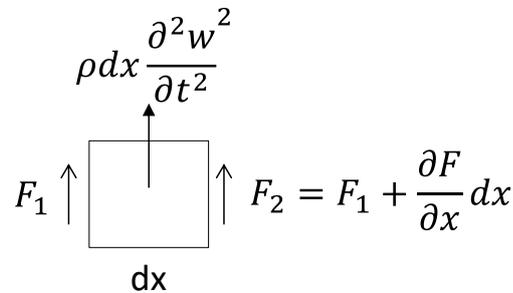


図 4.4.9 梁の微小部分の釣り合い

振動の方向は鉛直の  $w$  方向、長手方向の座標を  $x$  とする。図 4.4.9 に示すように梁の微小部分  $dx$  に注目すると、鉛直方向の慣性力（鉛直加速度と微小部分の質量の積）と、微小部分とその両側から受ける剪断力とが釣り合うとして運動方程式が作れる。前節で説明したように剪断力は曲げモーメントの  $x$  による微分（曲げモーメントは剪断力の  $x$  に対する積分）で表され、曲げモーメントは梁の曲率に比例し、曲率は撓みの 2 階微分で表される。以上のことから、梁の撓みの自由振動の運動方程式は次のようになる。

$$\rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + EI \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} = 0 \quad (4.4.4)$$

ただし、 $\rho$  は梁の密度、 $A$  は断面積、 $EI$  は曲げ剛性である。

このタイプの運動方程式は変数分離法によって解くことができる。変数分離法は時間  $t$  と位置  $x$  の関数を、時間のみ関数  $T(t)$  と位置のみ関数  $X(x)$  の積と仮定して時間の常微分方程式と位置の常微分方程式の二つの常微分方程式に分離する方法である。

この方程式を解くと 2 つの未知係数を含む時間の関数と 4 つの未知係数を含む位置の関数が得られる。時間の関数は振動を表し、位置の関数は振幅分布を表す。時間の関数の未

## 第4章 海洋構造物に作用する荷重と応答

知係数は初期条件（時刻ゼロの時の撓みと撓み速度）、位置の関数の未知係数は両端の境界条件を与えることで決定する。端部が自由であるとした場合（船舶のように船首・船尾に拘束が無い場合境界条件は自由である）、曲げモーメントと剪断力がゼロである。

境界条件を表す方程式から無限個の固有周波数および個々の固有周波数に対応した位置の関数  $X_n(x)$  が求まる。 $X_n(x)$  を  $n$  次の固有モード関数という。表 4.4.1 に境界条件に対応した固有モード関数の形状を示す。

表 4.4.1 モード関数の形状

境界条件	振動次数	振動モード
自由—自由	$n=2$	
	$n=3$	
	$n=4$	
単純支持—単純支持	$n=1$	
	$n=2$	
	$n=3$	
固定—固定	$n=1$	
	$n=2$	
	$n=3$	
固定—自由	$n=1$	
	$n=2$	
	$n=3$	

(出典：吉田 (2010) )

次に、加振力が作用する場合を考える。運動方程式は次のようになる。

$$\rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + EI \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} = p(x, t) \quad (4.4.5)$$

ただし、 $p$  は外力で、時間  $t$  と位置  $x$  の関数とする。

この場合の強制加振応答を固有モード関数の重ね合わせで解く方法をモーダルアナリシスと呼ぶ。モーダルアナリシスでは、撓みを固有モード関数  $X_i(x)$  と  $i$  次の固有モード関数に対応する時間の関数  $T_i(t)$  の積の和で表す。

$$w(x, t) = \sum_{i=1}^{\infty} X_i(x) T_i(t) \quad (4.4.6)$$

この式を運動方程式に代入し、両辺に固有モード関数  $X_j(x)$  をかけて  $x$  について積分すると  $j$  次の固有モード関数に対応する時間の関数  $T_j(t)$  の常微分方程式が得られる。ここで、固有モード関数の直交性という性質が使われる。 $p(x, t)$  を時間の余弦関数で与えて常微分方程式を解くと周波数応答関数が得られる。

時々刻々の梁の撓みが求まると、時々刻々の梁の曲率、曲げモーメント、応力を求めることができる。

(2) 鉛直柱の波浪中振動

海底に固定された鉛直の柱に波が入射し振動する場合を考える。振動の方向は水平方向を  $u$  方向、鉛直方向の座標を  $z$  とする。梁の振動と同様に運動方程式は次式のようにになる。

$$\rho A \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + C \frac{\partial u}{\partial z} + EI \frac{\partial^4 u}{\partial z^4} = p(z, t) \quad (4.4.7)$$

ただし、 $C$  は線形化された構造減衰係数、 $p$  は波浪外力とする。

円柱の直径が波の波長に比べ小さい時、波浪外力のモデルとして、モリソン式が有効である。

単位長さの没水柱に作用する水平方向の波浪外力  $f_w$  はモリソン式で以下の様に表される。

$$f_w = C_M \rho \frac{\pi D^2}{4} \dot{u} + C_D \frac{1}{2} \rho D u |u| \quad (4.4.8)$$

右辺第1項は質量力、第2項は抗力である。また、 $\rho$  は海水密度、 $D$  は柱の直径、 $u$  は波粒子の  $x$  方向速度、 $C_M$  は質量力係数、 $C_D$  は抗力係数である。 $C_M$ 、 $C_D$  は実験によって求められる。

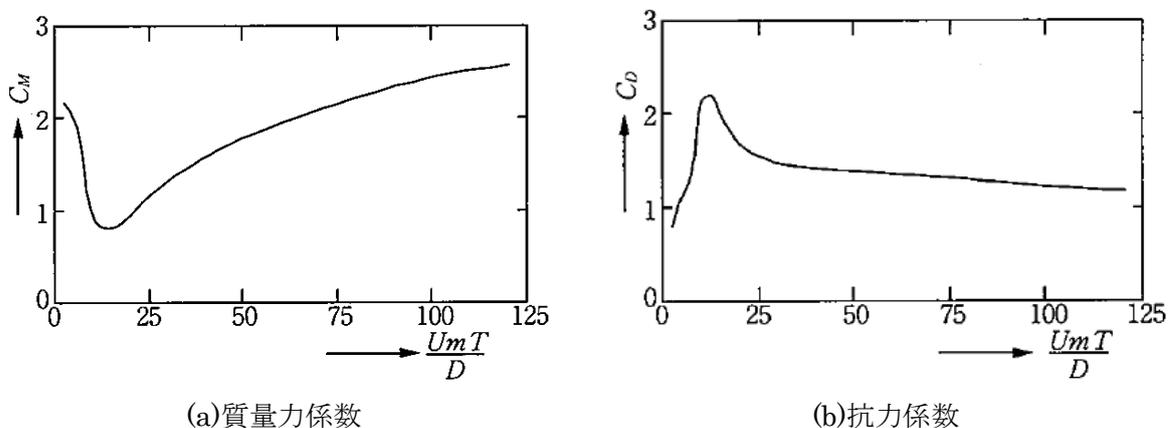


図 4.4.10 モリソン式の係数

## 第4章 海洋構造物に作用する荷重と応答

(出典：吉田 (2010) 著者図を調整)

鉛直柱の振動を扱う場合、式中の速度・加速度は波粒子と柱の相対速度・相対加速度を用いる。

相対速度・加速度のモリソン式を波浪外力として代入して整理すると、梁の強制加振と同様の運動方程式が得られる。ただし、境界条件が梁の場合とは異なる。

柱の下端は海底に固定されているため、変位と傾きがゼロになる。上端には通常構造物が設置される。上部構造物を剛体とすれば、柱の上端の剪断力は上部構造物の水平慣性力に等しく、曲げモーメントは上部構造物の慣性モーメントと回転角速度の積と等しくなる。

### 4.4.3 有限要素法による解析

#### (1) 有限要素法

近年は海洋構造物に限らず、有限要素法により構造解析を行うことが一般的である。有限要素法とは連続体を細かい要素に分割して解析を行う手法の総称である。有限要素法の説明としては、「マリンエンジニアのための有限要素法入門講座」(日本マリンエンジニアリング学会誌)に掲載されている1次元モデルが直感的で分かり易い。

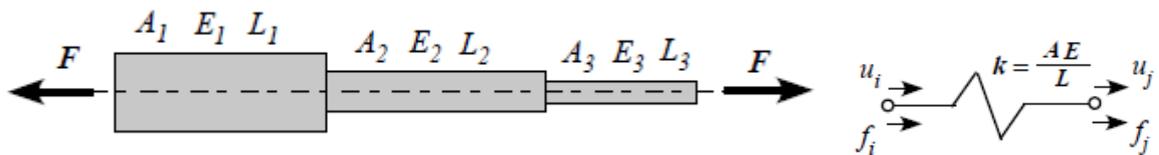


図 4.4.11 段付き棒

(出典：福岡 (2014) )

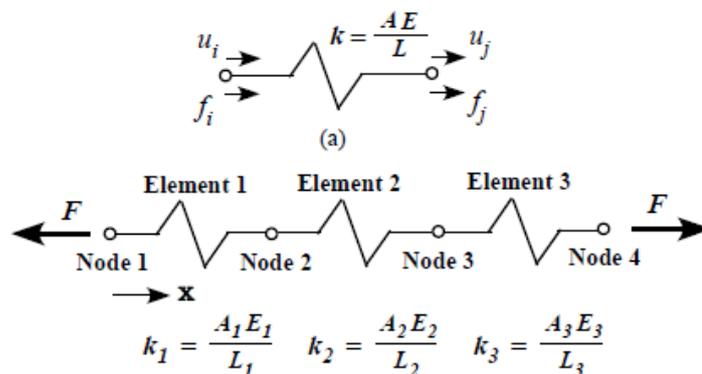


図 4.4.12 1次元ばね要素と段付き棒の有限要素モデル

(出典：福岡 (2014) )

上記の記事では例として図 4.4.11 左図に示す段付き棒の引っ張りが挙げられている。以

## 第4章 海洋構造物に作用する荷重と応答

下に簡略化して説明する。

直径の等しい部分を一つの分割要素とし、各要素を図 4.4.11 右図のようにばねと見なす。要素の両端を節点 (node) とすれば、図 4.4.11 左図の段付き棒は図 4.4.12 に示すような 3 分割要素 4 節点モデルとなる。この両端の荷重と変位の関係はフックの法則から以下の様  
に書ける。

$$\begin{aligned} k(u_i - u_j) &= f_i \\ -k(u_i - u_j) &= f_j \end{aligned} \quad \rightarrow \quad \begin{bmatrix} k & -k \\ -k & k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ u_j \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_i \\ f_j \end{Bmatrix} \quad (4.4.9)$$

式 (4.4.9) の右側の式が要素の剛性方程式である。左辺の  $2 \times 2$  のマトリクスは要素の剛性マトリクス  $[k]$ 、 $\{u\}$  と  $\{f\}$  はそれぞれ節点変位  $u_i$ 、 $u_j$  と節点力  $f_i$ 、 $f_j$  を成分とする変位ベクトルと節点力ベクトルである。要素の剛性方程式は、2次元、3次元要素も含めて要素の種類に関係なく以下の形式で書くことができる。

$$[k]^e \{u\}^e = \{f\}^e \quad (4.4.10)$$

なお、式 (4.4.10) の添え字  $e$  は要素 (element) を意味している。解析モデル全体の節点変位と節点力の関係を表す式を全体剛性方程式と呼び、要素の剛性方程式と同じくマトリクス形式で書くことができる。

$$[k]\{u\} = \{f\} \quad (4.4.11)$$

$[k]$  の行数と列数、節点変位ベクトル  $\{u\}$  と節点力ベクトル  $\{f\}$  の列数はモデル全体の自由度に等しい。例えば 3次元応力解析では 1 節点あたり 3 つの変位成分があるので、節点数を  $n$  とすると  $[k]$  のサイズは  $3n \times 3n$  となる。

$$\begin{bmatrix} k_1 & -k_1 & 0 & 0 \\ -k_1 & k_1 + k_2 & -k_2 & 0 \\ 0 & -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 \\ 0 & 0 & -k_3 & k_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{Bmatrix} \quad (4.4.12)$$

上式は段付き棒モデルの全体剛性方程式を示しており、 $[k]$  の行数と列数は 4 である。例えば 3 行 3 列の対角成分は、要素②と③の剛性マトリクス成分である  $k_2$  と  $k_3$  が組み込まれるので  $(k_2 + k_3)$  となっている。このように要素の剛性マトリクスから全体剛性マトリクスの組み立てには“要素の結合”の情報が必要となる。

任意の構造物のモデル化を行う場合、3次元要素が必要になる。一つの要素の中で最も節点数の少ない 3次元要素は図 4.4.13 に示す 4 面体要素で節点数は 4、要素の剛性マトリクスのサイズは  $4 \times 3 = 12$  である。

## 第4章 海洋構造物に作用する荷重と応答

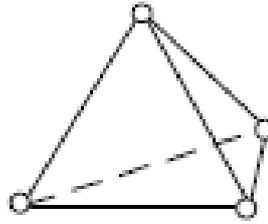


図 4.4.13 4面体要素

### (2) 浮体構造物の構造応答解析

浮体の構造解析を時間領域で行うことを考える。これまで、連続体の微小部分の運動方程式を作成する場合、慣性力とその他の力（復原力、減衰力、外力）が釣り合うと考えたが、有限要素法を用いて解析を行う場合、復原力とその他の力（慣性力、減衰力、外力）が釣り合うと考えると分かり易いと思われる。

吉田宏一郎らが行っているような、セミサブ浮体の部材を質点と曲げでモデル化し波浪中運動と撓み振動を一体で解く手法もあるが、現状では動揺を計算し、波浪外力・慣性力等の荷重を算出してから構造応答解析を行う二段階法の方が主流と思われる。

二段階法では浮体の動揺解析を行うことで、慣性力、付加質量力、造波減衰力、波浪外力、係留ライン張力（係留点に作用する）、DPSの推力（スラスタ取り付け点に作用する）（総称して荷重という）を要素の節点毎に時々刻々算出し、時々刻々全体剛性方程式を解く。この場合、慣性力は浮体の動揺に伴うものであり、部材の振動は考慮されない。

### (3) 応力集中とズームング

有限要素法は連続体を微小要素に分割していることから必ず誤差を伴う。要素を細かくしていくと解析結果が真値に収れんすることは知られている。しかし、むやみに要素を細かくすると解析時間がかかり、コストと労力を増大させる要因となる。高精度で効率よく解析を行うためには要素の分割方法に熟練を要する。

部分的に詳細な応力分布を求めたい場合、ズームングの手法が用いられる。部材と部材を接合するような場所は応力集中が生じやすい。応力集中とは、切り欠きや段差などで平均加重を断面積で割った値よりも高い応力が発生する現象である。

このような場所で、全体解析を行った後、局部的に細かい要素を設定し、全体解析結果を外荷重として構造解析を行うのがズームングの手法である。

## 第4章 海洋構造物に作用する荷重と応答

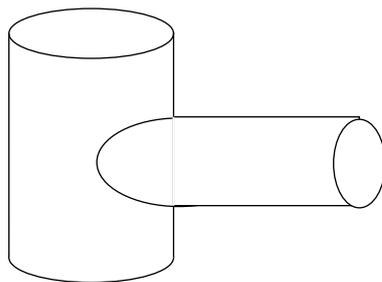


図 4.4.14 ブレース接続部

### 4.4.4 安全性評価

海洋構造物の構造安全性評価は係留ラインの評価手順と基本的には同じである。ただし、係留ラインは引っ張りのみが作用する構造物であるのに対して、海洋構造物一般は圧縮も作用する。このため、終局限界、疲労限界に加え圧縮を受ける部材については座屈のチェックが必要である。

## 4.5 まとめ

本章では主に浮体の動揺解析と構造解析の手順・方法について述べた。動揺解析手法や構造解析手法は基本的に運動方程式の解法で、数学的素養が必要である。近年は動揺解析も構造解析も汎用プログラムが普及し誰でも解析ができるようになった反面、解析結果の妥当性のチェックには依然として現象に対する理解が不可欠である。本章では現象に対する理解を深めるため、その基本について平易に解説したつもりである。

#### 第4章 海洋構造物に作用する荷重と応答

##### <参考資料>

- 元良誠三. 船体と海洋構造物の運動学 (改訂第三版). 成山堂, 2010, 362p.
- 吉田宏一郎. 海洋構造力学の基礎. 成山堂, 2010, 345p.
- 金沢武 他. 材料力学演習 1. 倍風館, 1984, 226p.
- 合田良實. 港湾構造物の耐波設計 (増補改訂第3刷). 鹿島出版会, 1997, 333p.
- 湯川和浩 他. メタンハイドレート試探掘用リグの基本計画. 第22回海洋工学シンポジウム OES22-072. 日本海洋工学会・日本船舶海洋工学会, 2011, p.1-6.
- 福岡俊道. マリンエンジニアのための有限要素法入門講座 (その1). 日本マリンエンジニアリング学会誌. 2014, 第49巻, 第1号, p.111-118.
- 九州の世界遺産. ”三菱長崎造船所 ジャイアント・カンチレバークレーン”. 九州観光推進機構. [https://www.welcomekyushu.jp/world\\_heritage/spots/detail/18](https://www.welcomekyushu.jp/world_heritage/spots/detail/18) (cited 2020-12-31)
- International Organization for Standard. Petroleum and natural gas industries -- Specific requirements for offshore structures -- Part 7: Stationkeeping systems for floating offshore structures and mobile offshore units. ISO19901-7, 2013, 184p.
- Det Norske Veritas. Position Mooring. DNV-OS-E301, 2013, 101p.
- Technip.”Technip awarded first spar platform in Malaysia for the Kikeh field”. Technip. <https://investors.technipfmc.com/news-releases/news-release-details/technip-awarded-first-spar-platform-malaysia-kikeh-field> (cited 2020-12-31).Bluewater. “What is an FPSO?”. Bluewater. <https://www.bluewater.com/fleet-operations/what-is-an-fps/> (cited 2020-12-31).
- Gazprom Marketing and trading.” Ship-to-ship transfer - making the most of our shipping assets”. Gazprom Marketing and trading. <https://www.gazprom-mt.com/WhatWeSay/editorial/Pages/Ship-to-ship-transfer---making-the-most-of-our-shipping-assets.aspx> (cited 2020-12-31).
- ILTWMT. “Norway’s Draugen Oil Platform is an Engineering Marvel”. 2011-08-18. <https://www.iliketowastemytime.com/swedens-draugen-oil-platform> (cited 2020-12-31).

### 5 位置保持技術

#### 5.1 はじめに

通常船舶とは大きく異なり、海洋開発で使用される浮体は一定の場所に位置保持しながら作業することが求められる。そこで本章では通常船舶と差別化するために、位置保持が求められる船舶のことを「位置保持浮体」と呼ぶことにする。外乱が無いところでの位置保持は容易なものであるが、海洋という厳しい環境では、前章で述べたように、風、波浪、潮流という巨大な環境外力が存在しているため、それに対抗するように浮体を位置保持させることは大変困難な作業である。したがって、海洋開発に従事するエンジニアには初期設計段階で位置保持浮体に作用する環境外力を計算した上で、位置保持浮体に求められる仕様を十分に考慮して最適な位置保持設計を行うことが求められる。

位置保持技術としては通常、係留方式と DPS (Dynamic Positioning System) 方式のいずれかが採用される。前者はパッシブタイプであり、後者はアクティブタイプと分類される。海洋石油天然ガス開発の場合には、掘削フェーズでは、短期間の移動が必要であるために DPS による位置保持が採用されるが、生産フェーズでは係留方式が採用されることが多い。

本章ではこの2つの技術について述べることにする。

#### 5.2 係留技術

##### 5.2.1 概要

係留とは係留錨 (アンカー) と係留ラインを用いた機械的な位置保持方式である。アンカーとは係留ラインを海底把持するための巨大なウェイトのようなものであり、係留ラインはチェーンや合成繊維索、ワイヤーなどの幾つかの材料を複合的に組み合わせることによって構成されるものである。係留はパッシブタイプの位置保持方法であるため、十分安全な設計を行えば、予測を超えるような巨大な環境外力が発生する等の場合は除いて、浮体が突然、漂流するなどの事故が発生することは稀である。また、技術そのものが非常にシンプルで、その設計手法も確立されている点が大きな特徴である。

##### 5.2.2 様々な係留方法

前述した通りに、係留とは海底と位置保持浮体をアンカーと係留ラインによって機械的に繋ぎ止める方法であるが、その方法にもさまざまなものが存在する。従来はカテナリー係留と呼ばれる方法が多くの場合で採用された。これは係留ラインとしてチェーンを用いた際に行われる方法で、図 5.2.1 のようにチェーンそのものの重量 (自重) によって生じる復原力 (元の場所に戻そうとする力) を利用した係留方法である。位置保持浮体が環境外力と釣り合った状態 (力学的には平衡状態) から位置保持浮体がある方向に動く (オフセットする) と、片側の係留ラインがその自重によって位置保持浮体を大きな力で引き戻そうとする。したがって、係留チェーンの重量が大きくなるほど、大きな復原力を生じることができる。こ

## 第5章 位置保持技術

の復原力発生メカニズムこそが係留方法がパッシブタイプと呼ばれる所以でもある。

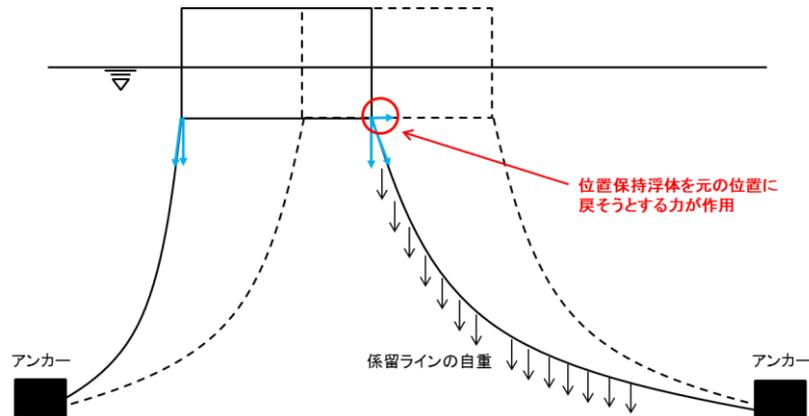


図 5.2.1 係留ライン復原力発生原理

深海域で採用される係留は海底から順に、アンカー、アンカーチェーン、チェーンまたはロープ（鋼線製ワイヤーロープ、あるいは合成繊維ロープ）により構成されることが多い。それぞれの部分間の接続にはコネクタが使用される。従来、水深が 300m より浅い初期の深海開発においては全てチェーンが用いられていたが、水深が 300m を超すあたりから、重量軽減と係留索の剛性を増す目的でチェーンの代わりにワイヤーロープが使用されるようになった。水深 2,000m を超すとチェーンとワイヤーロープの組合せでは、係留索の自重が過大となるため、ポリエステルを代表とする合成繊維ロープが用いられるようになった。合成繊維ロープは、浮体上の巻き上げ装置や海底の砂などと接触すると、表面が損傷を受けることで強度低下をきたす可能性があるため、船級規格等では、ロープの上端と下端に一定長さのチェーンあるいは鋼製ワイヤーロープを取り付けなければならないと決められている（但し、下端のロープに対しては、耐水性と砂などの侵入が完全に防止できることが証明された被覆物の使用が認められている）。

カテナリー係留においては復原力が発生する際、大きなオフセットが生じることになる。これを改善するために考案された方法がトート係留である。カテナリー係留は、係留ライン自重によって復原力を生成させていた一方、トート係留は係留ラインの剛性そのものによって復原力を生じさせるという点で異なる。係留ラインは平衡状態において係留ラインが張った状態となる。係留ラインとしては鋼製ワイヤーや合成繊維ロープなどが採用される。

このカテナリーとトート係留は海洋開発で最も利用される係留方法と言えるが、他にも FPSO にはタレット係留と呼ばれる方法やテンションレグプラットフォーム（TLP: Tension Leg Platform）には緊張係留などの特殊係留方法が採用されることもある。係留方法をまとめたものを図 5.2.2 に示す。尚、この図だけではイメージが沸かないと思われるので、図 5.2.3 と図 5.2.4 に係留ラインの状態と形式の中で代表的なものについて図及び写真で示した。係留設計において、位置保持浮体をどの程度のオフセットに収めたいか、係留ラインの疲労、強度が十分であるかなどを考慮しながら、適切な係留方法及び係留ライン材料を選択する必要がある。

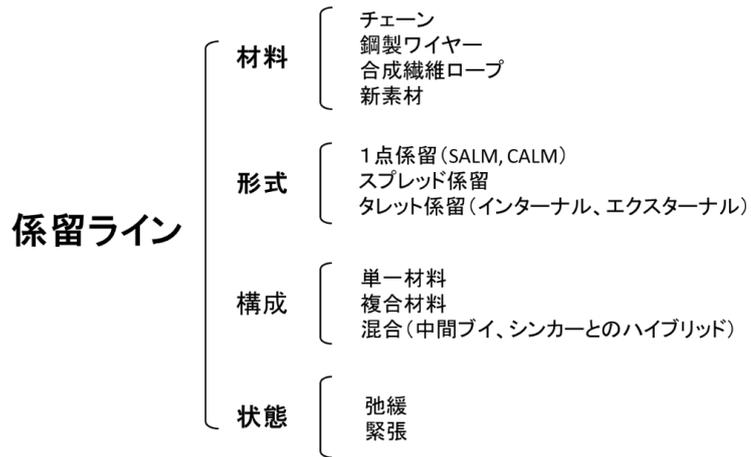


図 5.2.2 係留ラインの幾つかの分類

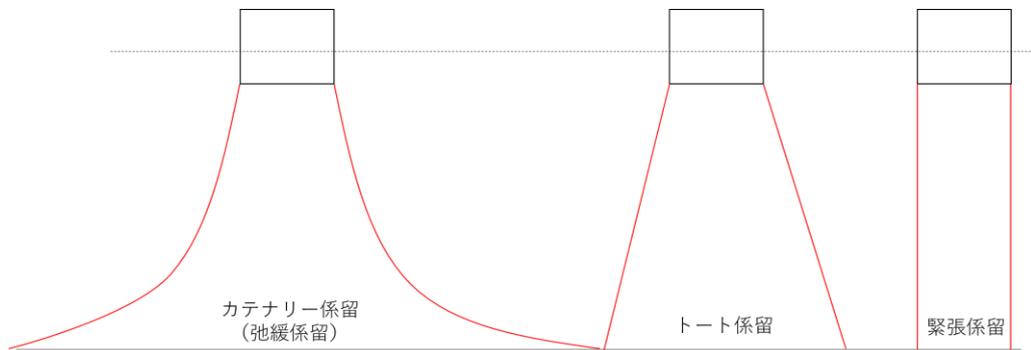


図 5.2.3 係留ラインの幾つかの状態

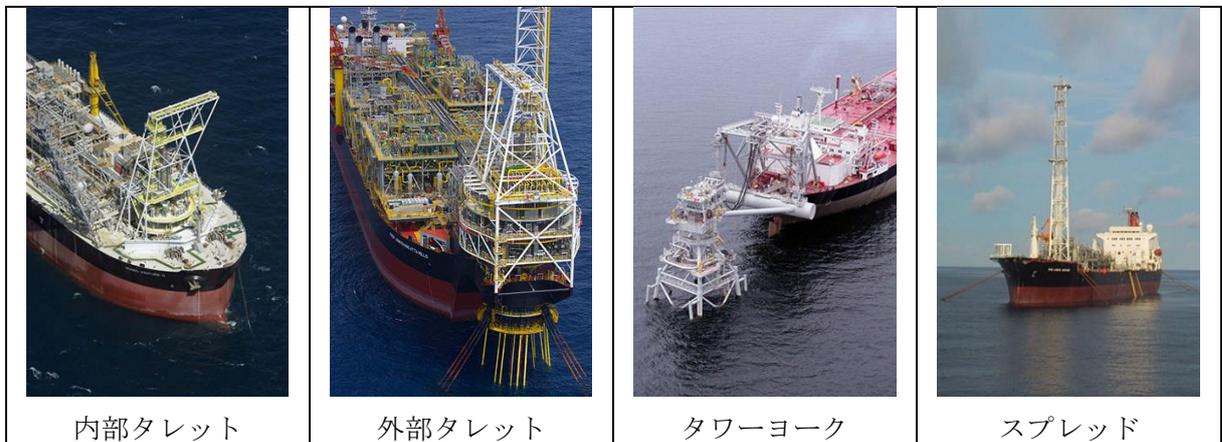


図 5.2.4 係留ラインの幾つかの形式

(出典：MODEC ウェブサイトによる写真を参考に作成)

### 5.2.3 アンカー

アンカーとは海底で係留ラインを固定するためのものである。錨いかりと表現した方がイメージ

## 第5章 位置保持技術

し易いかもしれない。



図 5.2.5 ドラッグ式アンカー

(出典 : JOGMEC (2016) )

アンカーにもさまざまなものがあるが、最も一般的なものはドラッグ式アンカーであり、図5.2.5のようなものである。最大のもは高さが6m、重量が65tonにもなる。これは係留ラインを通じてアンカーに水平方向の力が作用すると、爪に相当する部分が海底地層に食い込む形になり、大きな水平方向の抵抗力を生み出すことができる。その反面、この方法は垂直方向に力が作用すると抜けやすく、緊張係留のような大きな垂直力が働く係留方法には適していないため、サクションアンカー（パイル）と呼ばれる海底地層に垂直方向に埋め込むタイプのアンカーが用いられる（図 5.2.6 参照）。

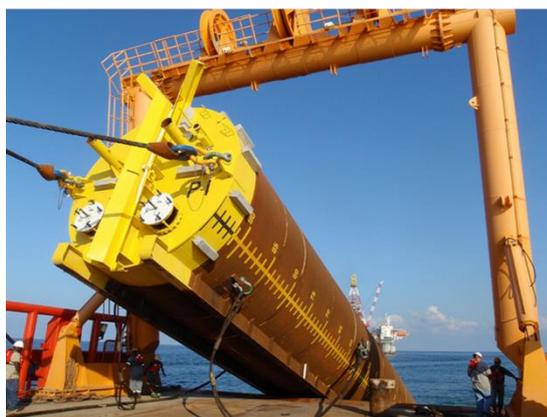


図 5.2.6 サクションアンカー

(出典 : Intermoor 社ウェブサイト)

## 第5章 位置保持技術

アンカーは設置直後には走錨（アンカーがうまく海底地層と接着しないこと）などの問題が発生することもあるが、時間が経つにつれて海底地層は安定した抵抗力を発揮する傾向にある。いずれにしても、アンカーを設置する前には海底地層調査が不可欠である。

### 5.2.4 設置（インストレーション）

アンカーや係留ラインを目的とする場所に的確に設置することは決して容易な作業ではない。大水深域で使用される係留ラインは数キロにも及ぶ長さになるため、一般的には作業船やそれを専業する特殊船が投入されることが多い。海底の様子を常時観察するために ROV も必要になる。例えば、チェーン設置の際には甲板上にチェーンを配置して、船体動揺によって移動しないように固縛する必要がある。その際にはチェーンのねじりを取り除いておく必要がある。設置作業中に船体姿勢調整のためのバラスト調整等の作業が発生しないようにチェーンの最適甲板配置を考える必要もある。鋼線製ワイヤーや合成繊維ロープの投入の際には、海底パイプ敷設船などで用いられる大型特殊作業船が用いられることもある。

## 5.3 DPS

### 5.3.1 概要

前節において述べた係留は、位置保持浮体が目標点（平衡点）からオフセットすることによって生じる係留復原力を利用した技術であった。つまり、ある程度のオフセットを許容する必要がある。この方法は歴史ある方法であるが、前節で述べた通りに大水深域で係留を採用しようとする、係留ライン自体の重量が大きくなってしまい、他の機器類の搭載が限定されてしまう。また、インストレーションに多大な時間を要することも大きな問題である。

そこで考案されたものが DPS による位置保持である。これは、センサー技術と複数基の推進器を利用した自動制御（フィードバック制御）による方式である。DPS を採用した浮体は年々増加傾向にあり、最近の浮体式掘削リグのほとんどは DPS による位置保持が行われている。環境外力の大きさに応じて推進器を自在に制御させるため、位置保持精度も係留方式と比べて非常に高い。DPS は海洋開発に不可欠な技術となっている。

DPS の歴史に少し触れておく。DPS は 1960 年代の海洋掘削に始まった。世界で最初に DPS が搭載された船は、1961 年建造の掘削船「Eureka」（Shell）と言われている。当初、DPS の位置保持精度は十分なものではなかったが、その後、1968 年に「Glomar Challenger」、1971 年に「SEDCO445」、1976 年に「Discoverer Seven Seas」、1977 年に「SEDCO709」

（DPS を採用した最初のセミサブ型掘削リグ）等の歴史的な掘削リグが建造され、1984 年には 13 基のセミサブリグが DPS を備えるに至った。その後も、DPS 搭載船が最大掘削水深記録を更新してきている。これらの建造にあわせて行ってきた DPS の改良の結果、石油掘削リグだけでなく、ルートトラッキング等が必要な海洋調査船、ケーブル及びパイプ敷設船、大型客船の入出港用、各種作業船にも採用されている。

### 5.3.2 制御システムとその基礎

DPS を理解するためには、制御工学の考え方を理解しておく必要があるため、簡単にその

## 第5章 位置保持技術

考え方について述べる。人間が機械やロボットを思い通りに動かそうとする場合には、コンピュータによる制御を行わなければならない。例えば、航行する船舶を一定の針路に保持する場合を考えてみよう。操船者が船橋から周辺状況を見ながら運航している際、強風が突然吹いて、船舶が一定の針路から外れたとする。その場合には、操船者は舵を自ら切って船舶の針路を元に戻そうとするだろう。操舵量が小さいと判断すれば、さらに大きく舵を切ろうとするし、大きすぎたと判断すれば適切に操舵量を小さくしながらうまく船舶を元の航路に戻そうとするだろう。おそらくこの操舵量は船舶の動きと操船者の長年の経験に基づき導かれたものである。制御工学はこれをコンピュータによって実現しようとするものである。制御工学を使えば、操船者の頭脳はコンピュータに実装された制御プログラム(アルゴリズム)、操船者の目は各種航海センサーにそれぞれ置き換わることになる。船舶工学ではこの技術をオートパイロットと呼ぶ。このように熟練者の技能をコンピュータに置き換えることにより、オートメーション化が実現され、私達の生活は激的に楽になり進化してきた。自動車、船舶、航空機などのビークルだけでなく、ロボットや化学プラントにおいても制御技術がなければ成り立たないと言っても過言ではない。

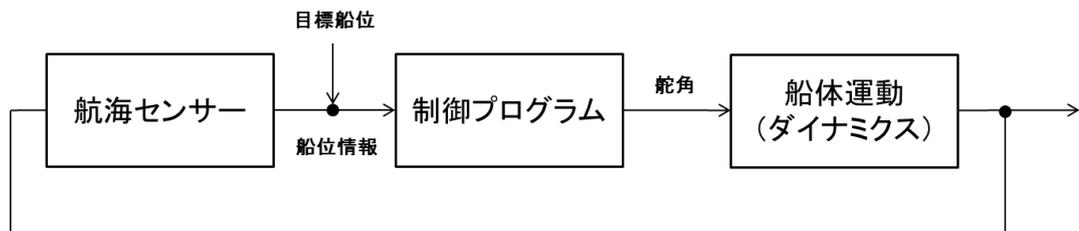


図 5.3.1 制御ブロック線図 (オートパイロットの場合)

それでは、一般的な DPS で採用されている制御システムのブロック図を図 5.3.2 に示しておこう。位置保持浮体の運動に関する情報をセンサーが感知し、それを修正しようと制御アルゴリズムが船体を目指点に戻すための必要な力を即座に演算する。その値は船体に作用するトータル力であるため、それを複数基の推進器で実現する必要がある。そこで、トータル力と推進器の型式と設置場所を考慮した上で、個々の推進器が出す推力等の情報を最適計算する。これは一般的には推力配分 (control allocation) と呼ばれている。その指令信号を基にして、個々の推進器はその指令信号に応じる形で個別に制御 (通常は、プロペラ回転数、ピッチ角、アジマススラスタの首振り角が制御される) されて推力を適切な方向に発生させる。その結果、位置保持浮体が目標点に戻るよう動くという流れである。この一連のフローが位置保持浮体を目標点に回帰させるまで繰り返されることになる。

制御アルゴリズムにおいては、船体位置、方位に関する情報だけでなく、船体速度、加速度等の情報が必要になる場合がある。そこで、制御工学の状態オブザーバーと呼ばれる考え方を使って微分情報などを推定して利用されることがある。この状態オブザーバーにはある種のローパスフィルタのような信号の低周波数成分のみを通過させるというフィルタ特性を持つものがあり、海洋工学ではそれをカルマンフィルタと呼ぶことがある。

## 第5章 位置保持技術

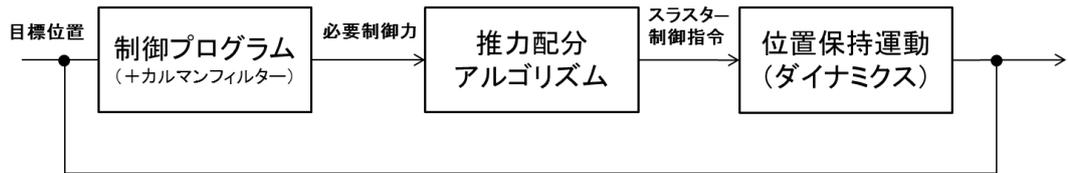


図 5.3.2 制御ブロック線図 (DPS の場合)

位置保持浮体は風、波浪、潮流などの環境外力に対抗するように位置保持することが求められる。波浪中の位置保持浮体には、短い波周期に応じた波周期運動と変動波漂流力により発生する長い周期を持った長周期運動の組合せによる重畳運動が発生する。仮に動特性の悪い推進器システムを採用した上で短周期運動を DPS で制御しようとする、故障トラブルが多発するだけでなく、大きな位置保持オフセットを誘発させてしまう。エンジニアは推進器システムの機械的特性を十分に把握した上で DPS 周波数帯を適切に設定し、目標とするオフセット性能を満足するような制御系設計が求められる。

### 5.3.3 推進器システム

DPS による位置保持浮体には複数基の推進器が船底に設置されることになる。推進器システムも様々なものがあるが、ここでは、代表的な推進器であるトンネルスラスタとアジマススラスタについて述べる。



図 5.3.3 トンネルスラスタ

(出典：川崎重工業ウェブサイト)

トンネルスラスタは、船首付近の船底に取り付けられるもので、図 5.3.3 に示すとおり、船底に大きな貫通穴（トンネル）を設けて装着される。トンネル内部に装着されるために、推力方向は一方向に限定されることからサイドスラスタと呼ばれることもある。通常船舶の接岸作業の補助目的として装備されているものもある。推力調整は一般的にプロペラのピッチ

## 第5章 位置保持技術

チ角を制御することによって行われる。

トンネルスラストの出力が小さく、トンネルによる推力の低減効果もあることから、大推力は期待できないものの、位置保持の際には回頭動作において大きな役割を發揮する。



図 5.3.4 レックスペラ

(出典：川崎重工業ウェブサイト)

アジマススラストは、主に船尾付近に設置される推進器システムである。技術開発が活発に行われ、図 5.3.4 に示すような大きな推力を出すことができるアジマススラストが最近では登場している。アジマススラストの特徴は、スラストの方向を自由自在に変えられる点にある。それにより、推力を適切な方向に出すことができるため、浮体を任意の方向に動かすことができる。これは位置保持において大きなメリットとなる。

最後に、大水深の新造 DPS 掘削船の推進器性能を従来型と比較したものを表 5.3.1 に示す。推進器が大出力化していることが一目瞭然である。このように DPS は大出力の推進器を必要としてきている。前章でも述べたが、例えば氷海域では巨大な氷荷重が浮体に発生するため、DPS による位置保持を実現するには、大きなスラストを出すことができる高出力推進器が必要である。推進器については出力（パワー）にのみ注目される傾向があるが、位置保持する際にはピッチ角や首振り角の機械的動特性（目標スラストやアジマス角までの到達時間）も重要なパラメータとなる。

表 5.3.1 DPS に使用されるスラスト容量

従来のDPSドリルシップ					
船名	船体サイズ L*B*D (m3)	スラスタ容量 (KW)	メインプロパルジョン (KW)	合計 (KW)	総発電 容量(KW)
Schahin Cury Lancer	45,000	6,520	4,470	10,990	13,000
Sedco 472	30,000	7,150	7,150	14,300	14,700
Discoverer 534	39,000	11,175	11,920	23,095	16,050
新造大水深DPSドリルシップ					
船名	船体サイズ L*B*D (m3)	スラスタ容量 (KW)	メインプロパルジョン (KW)	合計 (KW)	総発電 容量(KW)
Discoverer Enterprise	183,000	33,000	無し	33,000	38,880
Deepwater Pathfinder	186,000	24,000	無し	24,000	35,100
Glomar Hull 456	134,000	30,000	無し	30,000	35,200
Pride Africa	120,000	21,400	無し	21,400	29,220

(出典：JOGMEC (2016) )

#### 5.3.4 発電システムとパワーマネジメント

前述した巨大な推進器を複数基同時に動かすためには、それ相応の定格出力を持つ発電システム（発電機）が必要である。推進器への電力供給が出来ずに大事故を発生させることは絶対に避けなければならない。

発電機は推進器のみの電力をまかなうために発電するのではなく、船上で使用する様々な機器や生活用電源としての役割もある。エンジニアは推進器への電力供給不足にならないように余裕を見て、使用する発電機を選択する必要がある。万が一、発電機トラブルが発生し、推進システムへの電力供給ができないなどの不測の事態を想定して発電機は複数基搭載されることが一般的である。また、特定の発電機に過大な負荷が生じないように、パワーマネジメントシステムにより電力供給している負荷の状況に応じて発電機の台数を制御している。例えば、JAMSTEC が所有する地球深部探査船「ちきゅう」には 5,000kW の発電機が 6 基、2,500kW が 2 基も搭載されている。この他にも規則要求で非常用発電機が搭載される。

#### 5.3.5 センサー技術

DPS が位置保持を適切に行うためには、浮体運動や環境外力に関する情報をリアルタイムに取得する必要がある。代表的な測位装置である GPS 以外にも様々なセンサーが搭載される。

ここではトランスポンダと呼ばれる測位装置について説明する。位置情報をリアルタイムに把握するため、図 5.3.5 に示すように位置保持する目標点の海底付近にトランスポンダと呼ばれる送信機を設置して、船底に装着された受波器との間を超音波で測位する。これによって、位置保持浮体の位置情報を正確に計測することができる。

浮体には通常、風速計が数台設置されている。これは風が位置保持浮体に及ぼす風荷重を

## 第5章 位置保持技術

DP Officer（通常、DPO と略する作業者であり DPS 責任者）が把握することが目的であるが、DPS によってはこの風荷重を制御システムの中で自動計算して制御量の演算に用いることもある。また、潮流計（ADCP: Acoustic Doppler Current Profiler）や波高計も通常は設置されていることが多いが、その値が DPS による制御のために利用されるケースは稀であり、作業の安全性の確認を目的としたケースがほとんどである。

他にも、推進器の出力、ピッチ角や、アジマススラスト首振角、発電機の出力をリアルタイムにモニタリングしており、これらについても DPO のオペレーションの総合的判断の材料として利用されている。

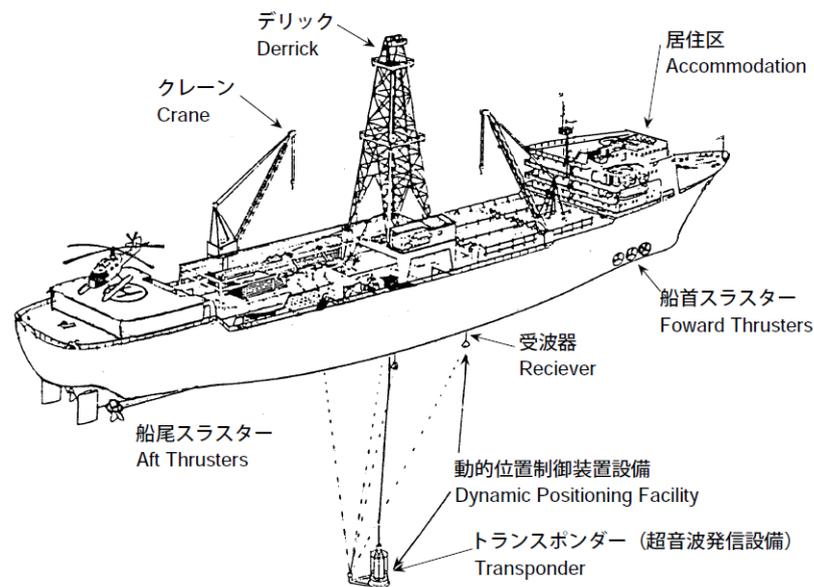


図 5.3.5 トランスポンダ

(出典：JOGMEC (2016) )

### 5.3.6 システムの信頼性とその対策

DPS はアクティブタイプの位置保持技術であるがゆえに、機器故障トラブルによって大きな事故が発生することがある。DPS を装備したダイビングサポート vessel、クレーン船及び掘削リグなど 70 隻の船が 1995 年の一年間に起こした位置保持不能事故は 22 件、94 年は 21 件、93 年は 32 件であった。

一般的に、想定外の巨大な環境外力や推進器が動かなくなって位置保持浮体が漂流することをドリフトオフ (drift off)、機器トラブルによってシステムが暴走することによって、制御不能になることをドライブオフ (drive off) と呼んでいる。両者とも避けるべき事態であるが、特にドライブオフは甚大な被害をもたらす可能性がある。ドリフトオフやドライブオフは絶対に避けなければならないが、もしもの場合を想定して、さまざまな対策が施されている。オペレーションの場合について簡単に述べておこう。潮流が激しい海域での掘削作業は、気象・海象条件が定点保持システムの限界に近づくと、いつでも逃げられる体勢を取ってお

## 第 5 章 位置保持技術

く必要がある。DPS には、緊急時には退避できるように EDS (Emergency Disconnect Sequence / System) 等から警報を DPO に周知するようになっている。図 5.3.6 に示すように位置保持浮体がノーマルエリアからグリーン、イエローエリアに突入すると、システムにはアラートが発生し、レッドエリアに入るとシステムはこれ以上、位置保持を継続することは出来ないと判断し、海底面などと接続されている様々な機器を切り離して、離脱作業が安全に行われるようになっている。エンジニアはドライブオフやドリフトオフによって、位置保持が継続できない状況を予め想定して、そのような場合にどのような回避作業を行えばよいのかを常に考えておく必要がある。

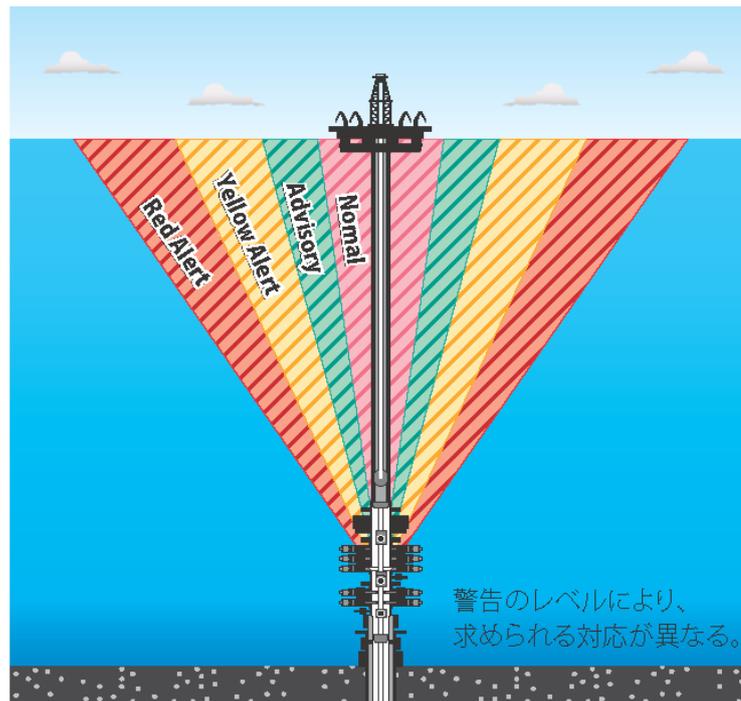


図 5.3.6 DPS オペレーションアラート

(出典：北村，稲田 (2010) )

### 5.3.7 DPS クラス

システムの信頼性に関連して、国際海事機関(IMO: International Maritime Organization) や船級協会で決められている DPS のクラスについて簡単に説明する。クラスとは DPS が機能損失においても位置保持不全とならない状況となる冗長性を有するシステムを明確に定義するものであり、例えば IMO ガイドラインに依れば次のように分類される。

- クラス 1 :  
単一の故障により位置保持機能喪失
- クラス 2 :  
動的機器 1 基の故障に対応しており、動的機器の単一の故障 (一般的に single failure と呼

## 第5章 位置保持技術

ばれる) によって位置保持機能が喪失しない。

○ クラス 3 :

エンジンルームや配電盤室を 2 つ以上の区画に分割し、制御コンピュータを別区画に配置するなどして、最大影響区画の全機器損傷に対して位置保持機能を保障しているため、DPS を構成する機器がある一つの区画の DPS に関連するすべての機器の損傷する状態でも位置保持機能が喪失しない。

ここで動的機器とは発電機、推進器、CPU、センサーなどを意味し、静的装置とは、配電ケーブルや区画を意味する。国際船級協会においても若干定義が異なるが、同様の指標を表 5.3.2 のように定義している。

表 5.3.2 DPS クラス

Class	Minimum Requirements in Group Designation				
	DPS-0	No Equivalent	DPS-1	DPS-2 DPS-2+	DPS-3
DNV GL	T	AUTS	AUT	AUTR	AUTRO
Lloyds	DP(CM)	No Equivalent	DP(AM)	DP(AA)	DP(AAA)
IMO	Not Recognized	No Equivalent	Class 1	Class 2	Class 3

(出典 : JOGMEC (2016) )

このようにシステムの冗長性を定義することによって、計画段階でシステムの信頼性を定量的に評価することができる。この信頼性指標は位置保持浮体への保険適用の判断基準としても活用されているため、エンジニアは必ず理解しておく必要がある。

### 5.4 まとめ

本章では浮体を定点に保持するための位置保持について、その代表的な係留方式と DPS について述べた。位置保持技術は、海洋開発を扱う上で無くてはならないものである。DPS は比較的新しい技術ではあるが、機械システムの暴走など、機械システムの信頼性問題が常につきまとうものの、インストレーションは不要で位置保持精度も高いことから、海洋開発において今後ますます増加すると思われる。一方、係留は歴史あるものである。技術もシンプルであり、その設計法も確立していることから、依然として高い技術ニーズがある。エンジニアはプロジェクト内容と要求仕様に応じて位置保持技術を適切に選択する必要がある。

## 第 5 章 位置保持技術

### <参考資料>

- 北村隆太；稲田徳弘. 海掘削概論～BP 社メキシコ湾原油流出事故を受けて～. 石油・天然ガスレビュー. 2010, Vol.44, No.6, p.11-24.
- (独) 石油天然ガス・金属鉱物資源機構 (JOGMEC). 海洋工学ハンドブック (第 6 版). 2016
- 三井海洋開発株式会社 (MODEC). 内容”. 三井海洋開発株式会社. <https://www.modec.com/jp/business/mooring/> (cited 2020-12-31)
- Intermoor 社. "Which foundation for your pipeline termination?". Intermoor 社. <https://intermoor.com/press-releases/which-foundation-is-optimal-for-your-pipeline-termination/> (cited 2020-12-31)
- 川崎重工業株式会社. “船用機械”. 川崎重工業. <https://www.khi.co.jp/mobility/marine/machinery/> (cited 2020-12-31)

### 6 サブシーシステム

#### 6.1 はじめに

海底面に設置される機器類を総じて「サブシーシステム (subsea system)」と呼ぶ。サブシーシステムは、パイプライン、ライザーなどの管路構造物、セパレータなどの機器、これらに動力を供給するためのアンビリカルケーブルなどから構成される。これらのシステムがなければ、全ての井戸と FPSO 等の洋上の生産施設とを結ぶ必要があるが、これらのシステムによって、最小限の本数で済むことや、浮体そのものの大きさが最小限で済むメリットがある。一方、デメリットとしては水深 2000m 以深に設置した場合では簡単に引き上げることができないため、故障した場合の対応が容易ではない。

本章では石油・ガス開発において用いられている各種のサブシー機器について 6.2 節で紹介し、重要な問題点となる管路内における閉塞の防止について 6.3 節に示す。また、6.4 節では、サブシーでの作業を行うための作業艇である遠隔操作無人潜水機 (ROV: Remotely Operated Vehicle) と自律型無人潜水機 (AUV : Autonomous Underwater Vehicle) について記す。

#### 6.2 サブシー機器

##### 6.2.1 概要

サブシーで用いられる機器のことを総称してサブシー機器と呼ぶが、ここでは特に石油・天然ガス開発に用いられるサブシー生産システム (SPS : Subsea Production System) について述べる。サブシー生産システムは、仕上げ坑井、パイプライン、海底坑口装置、生産用クリスマスツリー、フローラインシステムなどの海底機器や制御装置で構成され、特に坑口装置、アンビリカル、ライザー、フローラインを含めて SURF (Subsea, Umbilical, Riser, Flowline) と称される。サブシー生産システムは、以下の要素により構成される。図 6.2.1 に概要を示す。

- 海底掘削システム
- 坑口装置
- アンビリカル、ライザー
- マニフォールド、ジャンパー
- タイイン、フローライン
- 制御システム
- 海底への設置

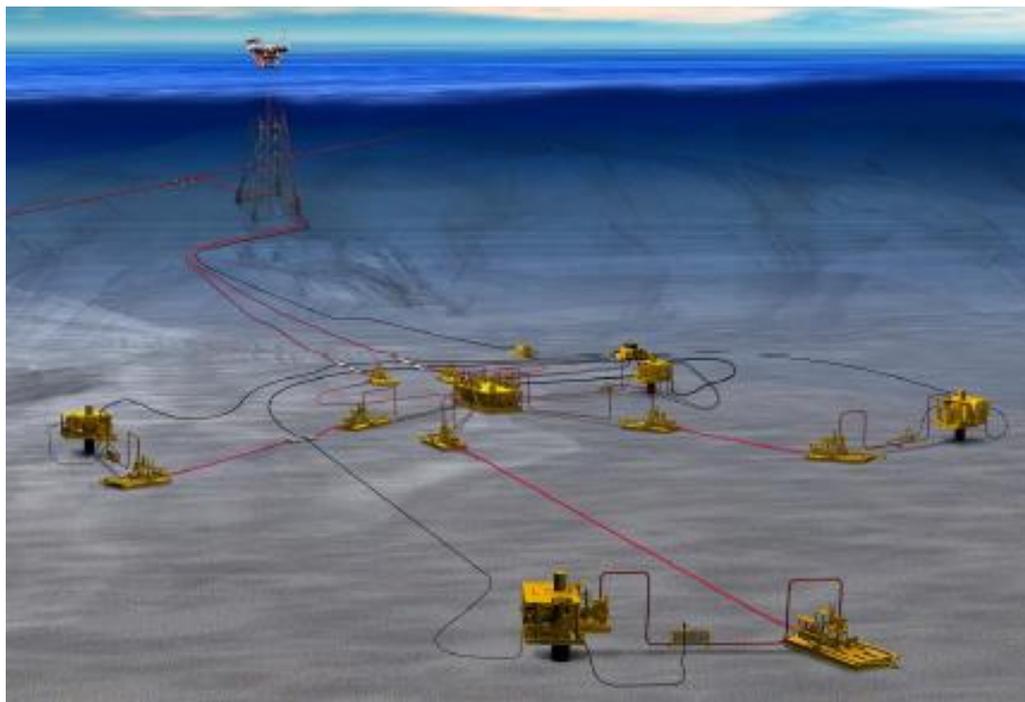


図 6.2.1 海底生産システム概念図

(出典：JOGMEC (2016) )

海底の坑井から生産された流体は、海底面上をフローラインで移送され、ライザーを経てプラットフォームに送られる。海底の坑井を制御するために、プラットフォームからアンビリカルと呼ばれる動力・信号ラインが坑口装置に接続されている。プラットフォームで処理された油は、パイプラインまたはシャトルタンカーで陸上に輸送され、ガスはパイプラインで輸送される。本章では、これらのサブシー機器のうち、アンビリカル・ライザー・フローラインの概要および設計の基本について解説する。

### 6.2.2 アンビリカルケーブル

アンビリカルは、海底のマニフォールドや坑口装置等を遠隔操作するために油圧機器の作動油、動力用電源、電気信号、インジェクション用ケミカルなどを送る複合ケーブルで、コントロールアンビリカル (control umbilical) ともいう。有索 ROV の操縦用にも同様のケーブルが用いられているが、これはテザーケーブルと呼ばれることが多い。多数のケーブルとホースを束ねた構造はバンドル (bundle) という。

アンビリカルシステムには、一般に以下のことが求められる。

- 電力、制御信号、データを基本的に同じケーブルで伝送できること。
- 一体として継ぎ目なく製造すること。
- 設計寿命の全期間において、原則として交換を必要としないこと。

アンビリカルの構成要素には電線、光ファイバーケーブル、鋼管、熱可塑性ホースがあり、

## 第6章 サブシーシステム

用途と必要に応じて組み合わされ、一般に断面は円形である。ここではこれらの構成要素の機能と特徴について述べる。

### (1) 用途

- 1) 海底坑口装置、マニフォールドのバルブ類の操作
- 2) ウェルヘッドジャケットの遠隔操作および電力供給
- 3) 緊急遮断弁の操作
- 4) 海底坑口装置のモニタリング信号の伝達
- 5) ケミカルインジェクション  
(ハイドレートインヒビター、腐食インヒビター、バイオサイド等の化学薬品)

### (2) 構造

アンビリカル構造は、含まれるラインの種類と本数等によって変わるが、基本構造は次の通りである。

- 1) 油圧ラインの場合、流量が少ないため内径が小さく、また、圧力変動も少ないため、個々のラインは単に内圧を受けるだけのプラスチックのチューブである。
- 2) アンビリカル全体の引っ張り・曲げ荷重は、外周に配置された鋼線やケブラーなどが受け持つ。超大水深では、内部が気体で満たされる機能を持つ場合を除いて強度的問題は少なく、水深 3,000m に対応できる。
- 3) 個々のホースやケーブルはポリプロピレン等の充填材で固定され、全体の表面をポリ塩化ビニル製シース (PVC sheath) で覆い、摩耗・損傷を防いでいる。
- 4) 電力線と信号線をアンビリカルに組み込む場合、電力線の電磁誘導障害に対するシールドが必要となるが、光ファイバーにはこのような問題がないため、信号は光が主流となった。

油圧ラインを中心としたアンビリカル構造例を図 6.2.2 に示す。アンビリカル末端は曲げや引張に対する外装部分の引き留め部と、各々のケーブル、ホースの接続部とに分けられる。曲げや引張を受ける引き留め部は、十分な強度を有するようフランジ結合であるが、個々のケーブルやホースは引き留め部とは別に図 6.2.3 のようにコネクター接続される。

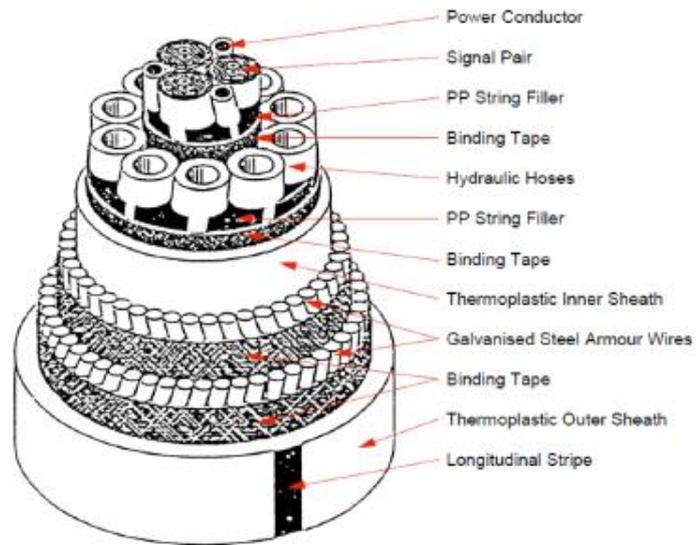
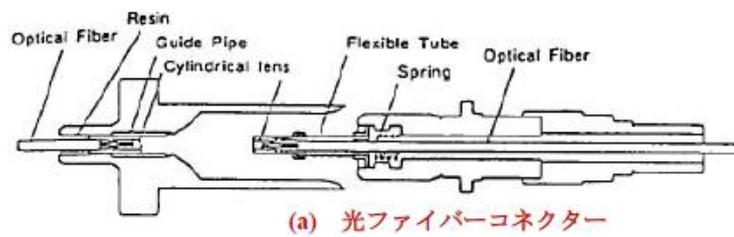
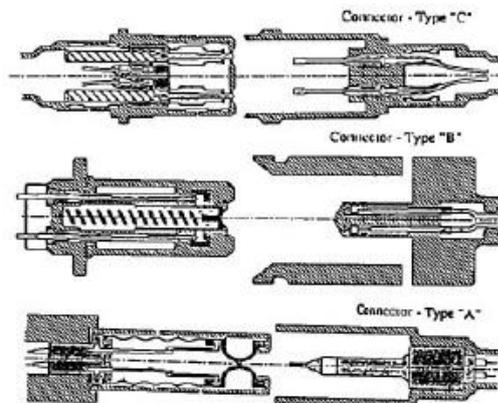


図 6.2.2 アンビリカルの構造例

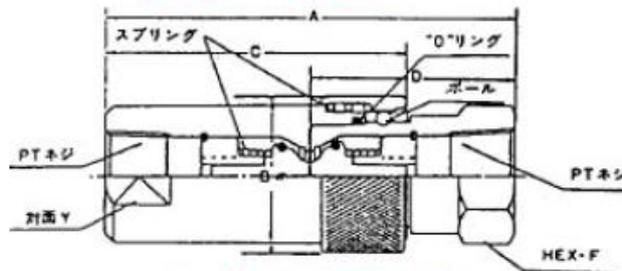
(出典 : JOGMEC (2016) )



(a) 光ファイバーコネクタ



(b) 電気ケーブルコネクタ



(c) 油圧ホースコネクタ

図 6.2.3 各ケーブルのコネクタ

(出典 : JOGMEC (2016) )

## 第6章 サブシーシステム

アンビリカルはフレキシブルライザーと並行して敷設されることが多く、敷設形状はフレキシブルライザーと同一になる。また、フレキシブルライザーとアンビリカルを一体としたものやバンドにて結束した IPB (Integrated Production Bundle) もある。

### (3) スタンダード

アンビリカルのスタンダードには API Spec17、API RP171 を元にして作られた ISO13628-5 がある。また、DNV GL(当時 DNV (Det Norske Veritas))は JIP (Joint Industry Projects) 成果に基づき、DNV-OSS-302 Offshore Riser Systems を 2010 年に発行している。

### 6.2.3 ライザーシステム

石油・天然ガスの業界では内部に流体を通す管のうち、海底から浮体まで立ち上がるものをライザーと呼び、使用目的から大きく掘削用ライザーと生産用ライザーに大別できる。また、材質や敷設形状からリジットライザー、フレキシブルライザー、スチールカテナリーライザー (SCR : Steel Catenary Riser)、トップテンションライザー (TTR : Top Tensioned Riser)、ハイブリットライザーのように区別することができる。ここではそれぞれのライザーについて、概要とその特徴を述べる。

#### (1) 掘削用ライザー

掘削用ライザーは図 6.2.4 に示すライザー掘削に用いられるリジット型ライザーパイプである(図 6.2.5 参照)。掘削用ライザーはドリルパイプの外側に鞘の様に配し、泥水と呼ばれる物理的・化学的調整を施した特殊な液体を掘削リグと坑底の間で循環させながら掘削を行う。泥水は、リグ上のポンプによってドリルパイプ内に送り込まれ、ドリルパイプ先端のドリルビットから噴出した後、坑内では坑壁とドリルパイプの間隙を、海底面からリグ上までは、ライザーパイプとドリルパイプの間隙を通過して戻ってくる。この泥水循環により掘削坑内の圧力バランスを保ちながら海底下数千メートルまで安定して掘削することが可能となる。また、海底面に設置された BOP により、突発的な地層内の高圧流体の噴出を防ぎ、安全な掘削が可能になる。石油・ガスの存在が予想される地点での掘削では、BOP を備えたライザー掘削が必須である。ライザーパイプ自体は通常鋼製で、両端に接続用のフランジ部を有する。直径は 16"または 21"で、長さは定尺管 (21m) に加えて、JAMSTEC の地球深部探査船「ちきゅう」で採用されている 27m や長さ調整用の短尺管 (数種類) があり、水深に合わせて全長調整ができる。さらに大水深海域における掘削ではライザーも長大になるため、ライザーの自重を支えるために管の周りに浮力体 (図 6.2.5 の白色物) を取り付けることがある。

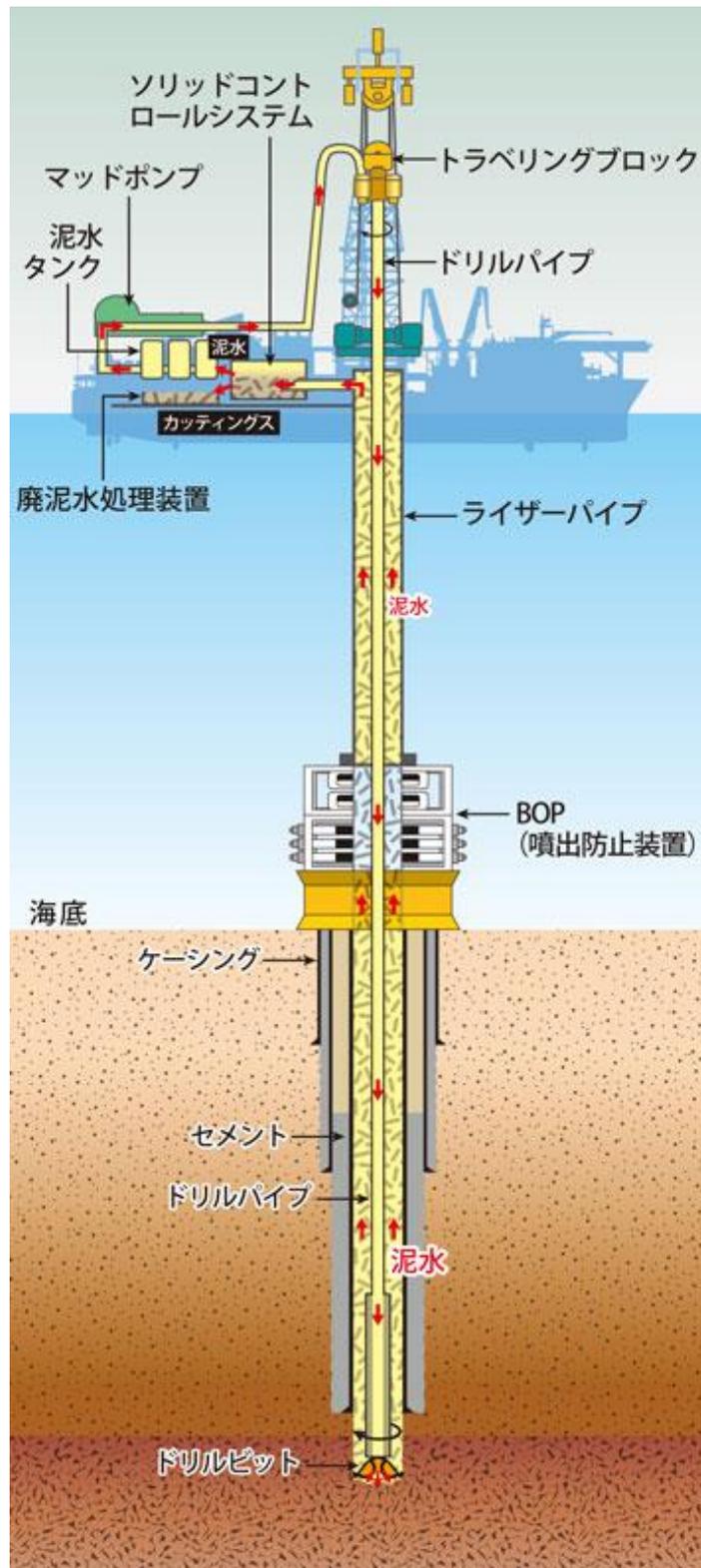


図 6.2.4 ライザー掘削

(出典：National Geographic 日本版)



図 6.2.5 掘削用ライザー向け浮力体

(出典：TRELLEBORG OFFSHORE)

### (2) 生産用ライザー

生産ライザーシステムは洋上生産プラットフォームまたは FPSO から海底までを接続するライザーパイプと、フローライン、マニフォールド、坑口 (wellhead) から構成されている。ライザーパイプは流体を洋上まで送り出すために用いられる浮体式生産システムの主要な機器である。これが大水深生産システムの最も複雑な側面のひとつになっている。

大水深油田開発に用いられるサブシーライザーシステムには様々な形式が存在するが、基本的にリジットライザーとフレキシブルライザーの 2 つのタイプがある。さらにこの 2 つを組み合わせたハイブリッドライザーも開発されている。

#### ① リジットライザー

リジットライザーは、おもに鋼製のライザーのことを指し、次項で述べる積層構造で可撓性の高いフレキシブルライザーとは異なり、一般に鋼材の 1 層のみで構成され、曲げ半径はフレキシブルライザーと比較すると大きくなる。また、潮流によって引き起こされる渦励振 (VIV : Vortex Induced Vibration) が発生しやすいため、メキシコ湾のような強潮流海域に設置する場合はストレーキやフェアリングといった VIV 抑制デバイスの取り付けが必要となる。

#### ② フレキシブルライザー

浮体式生産システムの中で、FPSO と FPS はその浮体が、波・風・流れ等の自然外力や喫水の変化などによって水平方向にも上下方向にも大きく変位する。このため、海底と浮体とを繋いでいるライザー管には、浮体の変位を吸収できるような可撓性 (flexibility) が必要になる。可撓性のあるライザーとして、フレキシブルライザー (flexible riser) が、1970 年代後半に開発された。フレキシブルライザーは、プラスチック製または鋼製のパイプを金属等で補強した複合パイプで、鋼管ライザー (リジットライザー) に比べて次のような特徴をもつ。

## 第6章 サブシーシステム

- i) 可撓性が大きい（許容最小曲げ半径が小さい）。
- ii) 工場で長尺製造するため、継ぎ手を最少にできる。
- iii) ライザー内面にプラスチック層を挿入し、耐食性をもたせることができる。
- iv) ライザーを構成するプラスチック層の熱伝導率が低いため、断熱性が高い。
- v) 再利用することもできる。
- vi) 軽量で、かつ、生産プラットフォームへの取り付け場所に制限がない。
- vii) 製造コストが高い。

また、フローティングホースなどとして用いられているラバーホースと比べると、次のような優れた性質を有する。

- viii) 最高使用圧力を高くできる。
- ix) 1本あたりのホースの長さを長くできる。
- x) ガスに対する気密性がよい。

フレキシブルライザーは浮体と海底部を接続するダイナミックライザー（dynamic riser）として開発されたが、フィールド内のフレキシブルフローライン（flexible flowline）として数多く採用されている。また数は少ないが出荷用のパイプラインにも利用されている。また、フレキシブルライザーは原油のみでなく、ガス輸送ライン、水圧入・ガス圧入ライン等にも用いられている。

フレキシブルライザーの構造は、各層が接着層によって相互に接着されているためボンデッドタイプと、各層が接着されていないアンボンデッドタイプが存在する。しかし、耐圧性・信頼性などの面からボンデッドタイプはほとんど使われていない。アンボンデッドタイプは、用途に応じて、また、メーカーによって若干異なるが、図 6.2.6 のような多層構造からなる。

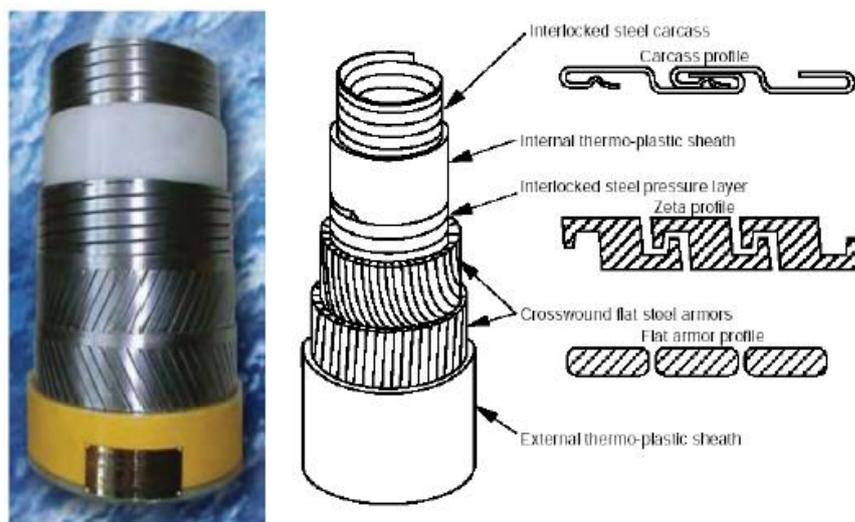


図 6.2.6 フレキシブルライザーの構造

(出典：JOGMEC (2016) )

## 第6章 サブシーシステム

フレキシブルライザーの端末部（FPSO、FPS など浮体への接続部）は大きな曲げモーメントや軸力を受けるため、接合用フランジとライザーパイプとが強固に固着するように端末加工処理されている。特に大きな曲げモーメントが作用する場合には段階的に曲げ剛性を変化させたコーン型のベンディングスティフナー（bending stiffener）と呼ばれる靴状構造を設ける。また、プラットフォームの火災等の非常時にフレキシブルライザーを端末部から瞬時に切り離し、後日再接続が可能なクイックカップリング（QCDC：Quick Connect/ Disconnect Coupling）を用いることもある。

### ③ スチールカタナリーライザー

スチールカタナリーライザーは、深海の浮体式生産プラットフォームにオフショアパイプラインを取り付ける一般的な方法であり、生産した原油やガスを海底面からプラットフォームへ送るラインである。その敷設形状は図 6.2.7 に示すように、海底パイプラインをプラットフォームに立ち上げ重力により自然にしならせた形式をとる。特殊なコネクションを設置する必要がなく、フレキシブルライザーより簡便で、コストも低いいため、費用対効果の高い手法として用いられる。

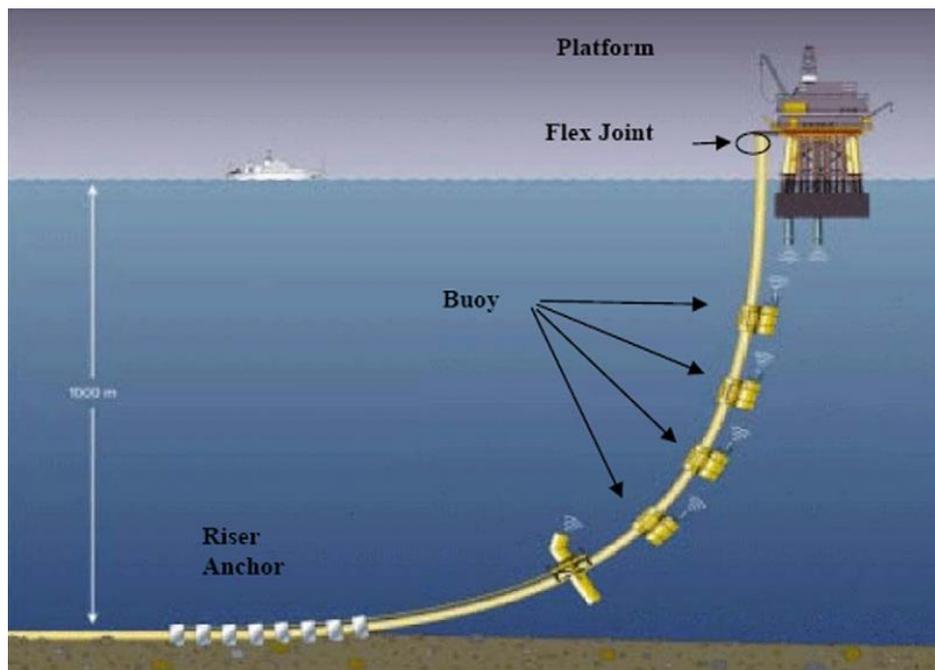


図 6.2.7 スチールカタナリーライザーの概略図

（出典：Nnamdi et al (2016)）

現在多くの SCR が実用化されているが、大水深下で用いられる場合は SCR がフレキシブルライザーと比較して重たいために負荷が大きくなり、設置や操業に関するリスクも高まるとされている。そのため、各石油開発会社は安全に操業するための分析・改良を実施している。また、SCR の敷設には規模の大きな敷設船が必要である。

SCR の有効張力は主に自重によるものなので、特に下端部で低い有効張力となり、潮

## 第6章 サブシステム

流に起因する VIV によって引き起こされる疲労損傷は、ライザーにとって致命的となる可能性がある。これを防ぐためにヘリカルストレークやフェアリングなどの VIV 抑制デバイスを使用することで振動を問題のないレベルまで低減している。

### ④ トップテンションライザー (TTR)

TTR は、海底の坑口と浮体式洋上生産設備とを接続する。TTR パイプは、通常、高圧の生産流体が流れることで動的負荷を受ける。また、環境荷重下において上端と下端の角度を維持し安定させるために、浮体に設置したトップテンショナーによって見かけ上の重量を超える張力をライザー上端に与えている。一般的に、生産ライザーに必要な張力は掘削ライザーより低く設定される。油圧式テンショナーは、ライザーをプラットフォームに対して上下方向に動かすことができる。これらのライザーは一般に図 6.2.8 に示すような TLP やドライツリー型スパーで使用される。

仕様要件に応じて、TTR は単管または複数本運用で用いる。ライザーは、ねじ式コネクターを備えたライザージョイントでプラットフォームのドリルデリックから直接取り付ける。

TTR は浅水深用に設計されたが、水深が増すに従って新しい設計の必要性も増している。

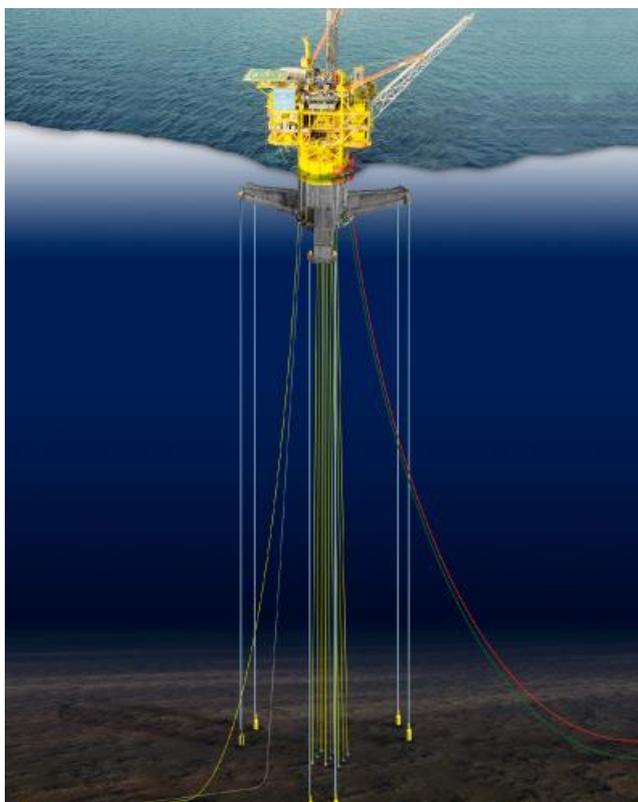


図 6.2.8 TLP に設置したトップテンションライザー

(出典：RIGZONE)

## 第6章 サブシーシステム

### ⑤ ハイブリッドライザー

ハイブリッドライザーとは、リジッドライザーとフレキシブルライザーの組合せである。ライザーの下部を鋼製の自立ライザー、浮体式システムとリジッドライザーの接続にフレキシブルライザーを用いる形態が一般的であるが、海象条件や水深など使用する環境に合わせたコンセプトが各種開発され、実用化されている。ハイブリッドライザーシステムの一例を図 6.2.9 に示す。

超大水深では、FPSO のオフセットと動揺によりフレキシブルライザーの張力が大きく、その適用限界は現在水深 1500m 程度であるため、ライザーの下部を鋼製の自立ライザーとし、上部をフレキシブルライザーとするハイブリッドライザーがメキシコ湾、西アフリカおよびブラジルで採用されている。基本的な構成は、下部ライザーと海中ブイ及び上部フレキシブルライザーであるが、ライザータワー (riser tower) 或いはハイブリッドライザー (hybrid riser)、さらに BSR(Buoyancy Supported Riser)などと呼ばれる。

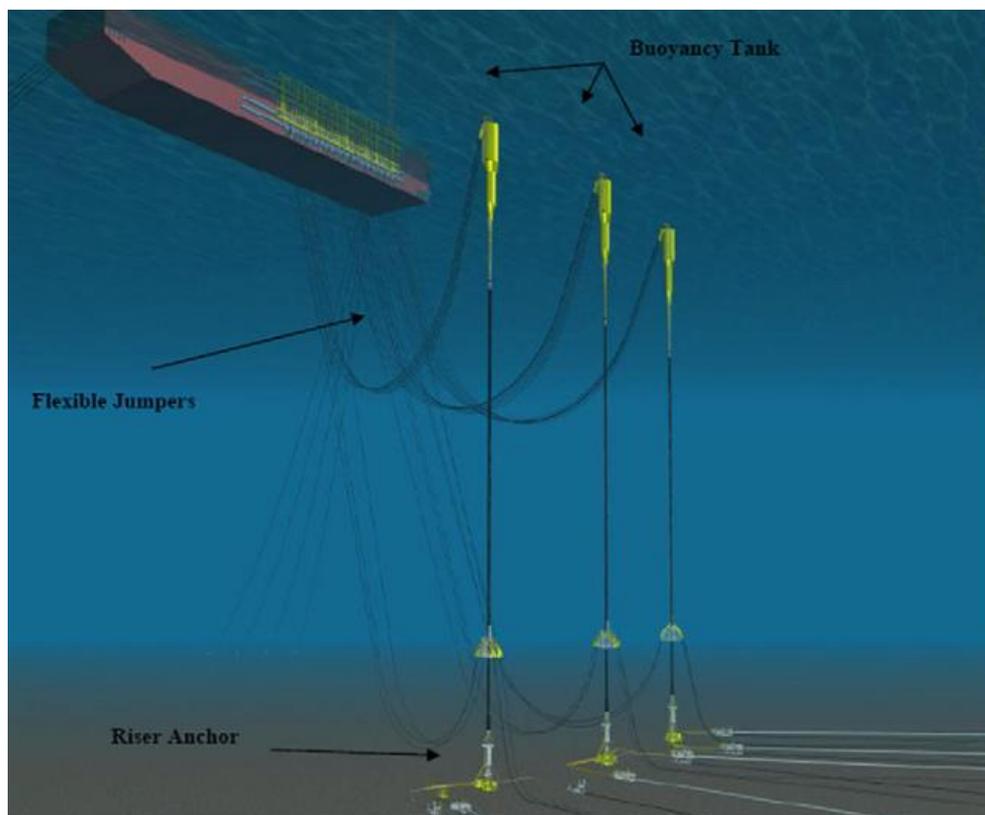


図 6.2.9 ハイブリッドライザーの概略図

(出典：Marine Technology News)

### 6.2.4 フローライン・パイプライン

サブシーフローラインは、海底坑口とマニフォールドあるいは洋上施設とを結ぶのに用いられる海中のパイプラインのことである。フローラインは、フレキシブルパイプかリジッド

## 第6章 サブシーシステム

パイプで構成され、それらは生産流体、リフトガス、注水、ケミカルを輸送する。フローラインは、ピグ (pig) によるメンテナンスが求められる状況では、ピグが循環してくるよう設けられた切り替え用スプール弁によって結合される。フローラインは単一のパイプの場合もあれば、搬送管内に束ねられた複数ラインの場合もある。単一のパイプであっても、束ねられたラインであっても、海底を輸送する途中で生産流体が冷やされる問題を回避するために断熱が必要とされる。図 6.2.10 にはサブシー生産システムの一部として用いられているフローラインの例を示す。

サブシーフローラインでは高圧・高温の下での使用がますます必要となってきた。より高圧の条件については、HP/HT (高圧・高温) フローラインプロジェクトでのパイプ材料の高グレード化の技術的挑戦につながっている。そこでは、生産物に  $H_2S$  や塩水が含まれる場合の耐食性仕様 (サワーサービス) を要求した。また、より高温の操業条件では、腐食 (corrosion)、降伏強度の低下、断熱被覆に関する挑戦が生じる。高圧・高温に曝されるフローラインでは、フローラインが拘束されているとき、流体の高温や内圧によって高い有効軸圧縮力が生じる。

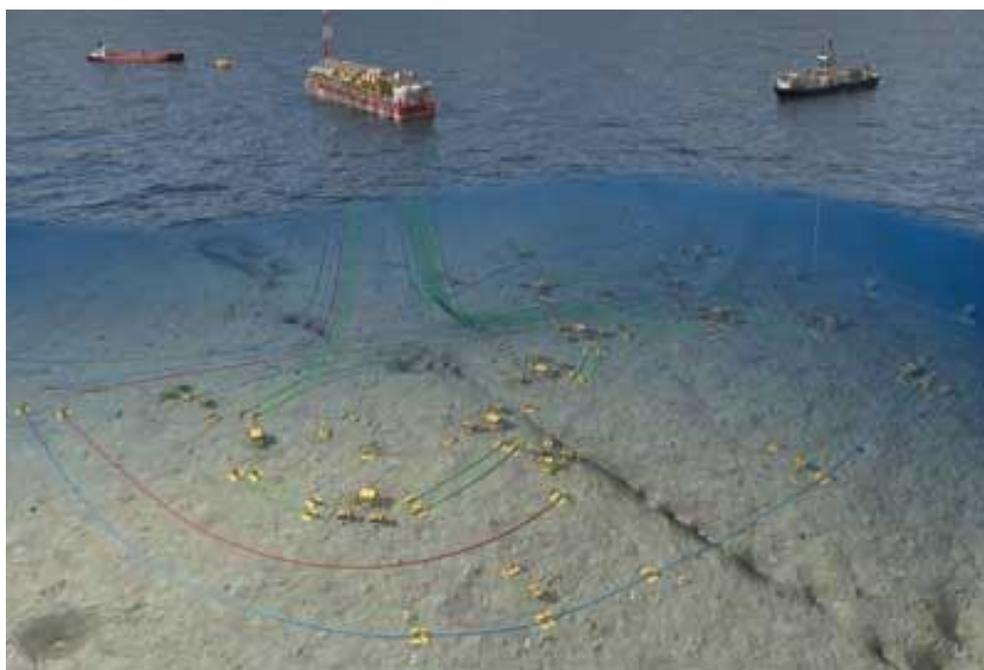


図 6.2.10 ナイジェリア AKPO 鉱区開発の概要図

(出典 : Offshore Magazine)

### 6.3 フローアシュアランス (flow assurance)

#### 6.3.1 概要

フローアシュアランスとは、管路内における流動性を確保することである。管路内における閉塞の原因となる物質としては、ハイドレート、ワックス (wax)、アスファルテン

## 第6章 サブシステム

(asphaltene)、スケールなどがある。また、腐食や浸食 (erosion) などの現象も重要である。本節では、まずフローアシュアランスを理解するために必要な管内の流動や伝熱のポイントを記し、次いで、閉塞の原因となる物質や関連する現象について記す。

### 6.3.2 管内流れ

本節では、管内の流れ、特に混相流 (multiphase flow) の特徴について記す。

#### (1) 管内の流れの分類

管内の流れはまず層流 (laminar flow) と乱流 (turbulent flow) に大別される。次式に示す Reynolds (レイノルズ) 数 ( $Re$ : Reynolds number) により、流れが層流であるか乱流であるかを推定することができる。

$$Re = \frac{D\langle u \rangle \rho}{\mu} \quad (6.3.1)$$

ここで、 $D$  は管の内径、 $\langle u \rangle$  は断面平均流速、 $\rho$  は流体の密度、 $\mu$  は流体の粘度を示す。一般に、 $Re < 2300$  では層流、 $Re > 3000$  では乱流となる。 $2300 < Re < 3000$  は層流から乱流への過渡状態である。

管内の流れは、層流でも乱流でも一様ではない。円管内の層流では中心付近が最も流速が速く、同心円状の速度分布となる。円管内層流の速度分布を与える式を Hagen-Poiseuille の式と呼ぶ。一方、乱流の速度分布は極めて複雑であるが、実用的には 1/7 乗速度分布則や対数速度分布則が用いて推定することができる。

管内の流れの流体摩擦係数  $f$  は、これらの速度分布則から求められ、 $Re$  を用いて表すことができる。層流では流体摩擦係数は  $Re$  に反比例する。

$$f = \frac{16}{Re} \quad (6.3.2)$$

乱流では、1/7 乗速度分布則からは次の Blasius の式が得られる。この式は、 $3 \times 10^3 < Re < 10^5$  の範囲で実測値とよく一致する。

$$f = 0.0791 Re^{-1/4} \quad (6.3.3)$$

対数速度分布則からは次の Prandtl の抵抗則が得られる。この式は、 $2.1 \times 10^3 < Re < 5 \times 10^6$  の範囲で実測値とよく一致する。

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1.74 \ln(Re \sqrt{f}) - 0.40 \quad (6.3.4)$$

また、流体摩擦係数は管の壁面の粗さにも依存する。平滑管と比較して、相対粗面度 ( $\varepsilon/D$ ) が大きくなるにつれて流体摩擦係数は増大する。ここで、 $\varepsilon$  は壁面の粗面度 (凹凸の平均的な高さ) である。各種円管内の流れの流体摩擦係数を図 6.3.1 に示す。

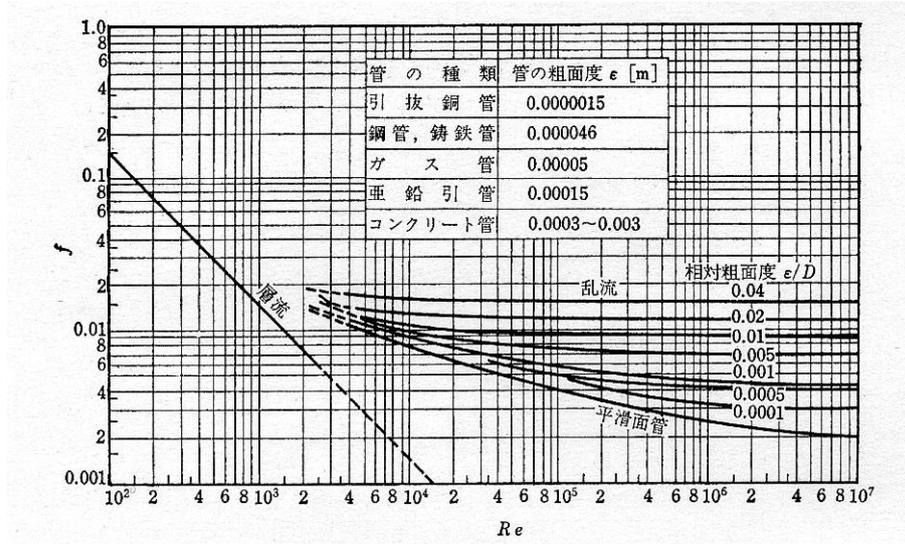


図 6.3.1 各種円管内流れの流体摩擦係数

(出典：水科，萩野（1981）)

(2) 混相流

管内の流れは、単相流と混相流に大別することもできる。単相流とは、例えば空気の流れや水の流れのように、単一の相を形成した流体の流れである。相 (phase) とは、気相、液相、固相といった物質の状態を示す用語である。これに対して、2種類以上の相が同時に流れている状態を混相流と呼ぶ（流速や流れの方向が同一である必要はない）。気相はどのような組成でも単一の相を形成するが、液相及び固相は単一の相を形成するとは限らない。例えば、水と油のように互いに混ざり合わない液体同士の組合せでは、2種類の液相が形成されている。固相の場合も同様であるが、工業的に混相流を取り扱う場合は、固相の種類については必ずしも厳格に区分されている訳ではない。なお、単一成分で混相流を形成する場合もある。例えば、ボイラなどの内部で液体の水と水蒸気が同時に流れている状態は混相流の代表的なケースである。

サブシーシステムの管路を流れる流体は、単一成分であることはまれである。原油は様々な炭化水素の混合物であり、さらに水分や砂などの固形物も含む。天然ガスの主成分はメタンであるが、このほかにも様々な炭化水素や二酸化炭素などのガス成分、さらに水分も含む。このような多成分系では混相流が形成されることは珍しくない。

混相流の特徴的な流動状況を流動様式と呼ぶ。二相流では2つの相の流速に応じて、層状流、プラグ流、気泡流といった流動様式が変化する。さらに、温度や圧力などの熱力学的な条件の変化や新たな成分の混入などにより、流動様式が変化することもある。管内の流れの多くが混相流であることは、フローアシュアランスを理解する上で重要な事項である。

混相流には気液二相流、固液二相流、液液二相流、気固液三相流などの種類があるが、本節では、代表的な事例として気液二相流及び固液二相流について記す。

## 第6章 サブシーシステム

### (3) 気液二相流

空気と水、水蒸気と水、空気と油、ガスと油といった気液二相流は、最も典型的な混相流である。代表的な気液二相流の流動様式を図 6.3.2 に示す。管内断面の多くを流体が占有し、少量の気体が気泡として流れている状態が気泡流である。気体の割合 (void fraction) が増大し、気泡同士が合体して栓のような空気の塊として流れている状態はプラグ流やスラグ流と呼ばれる。管内断面の多くを気体が占有し、少量の液体が液滴として流れている状態は噴霧流や液滴流と呼ばれる。

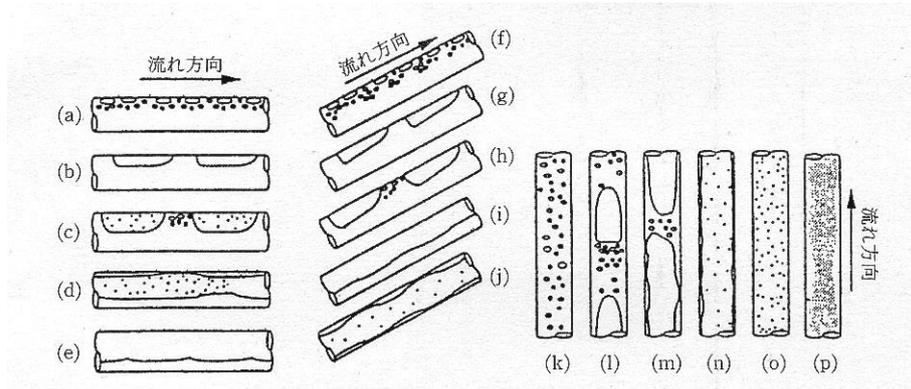


図 6.3.2 気液二相流の流動様式

(a), (f), (k) 気泡流, (b), (g) プラグ流, (c), (h), (l) スラグ流, (d), (j), (n) 環状流,  
(e), (i) 分離流, (m) フロス流, (o) 噴霧流, (p) 逆環状流

(出典：日本混相流学会 (2004) )

これらの流動様式を、各相が主流方向に連続か不連続かによって分類した結果を表 6.3.1 に示す。両方の相が連続または不連続の場合は分離流、どちらか一方が連続でもう一方が不連続の場合は分散流となる。両方の相が連続である分離流には層状流や環状流、両方の相が不連続である分離流にはプラグ流やスラグ流、そして分散流には気泡流や液滴流がある。

表 6.3.1 気液二相流の流動様式

		気体	
		連 続	不 連 続
液体	連 続	層状分離流 (環状流, 層状流) 	気相分散流 (気泡流) 
	不 連 続	液相分散流 (液滴流) 	栓状分離流 (間欠流: プラグ流, スラグ流) 

(出典：日本混相流学会 (2004) )

## 第6章 サブシーシステム

流動様式が生じる範囲を示した図を流動様式線図と呼び、流動様式を簡便に推定するために利用される。流動様式線図は、管路が水平か、垂直か、傾斜しているかによって区別される。図 6.3.3 に水平管内流における流動様式線図の例（空気－水系）を示す。気相または液相の流速が一定であっても、もう一方の相の流速が変化することによって流動様式が変化することが分かる。

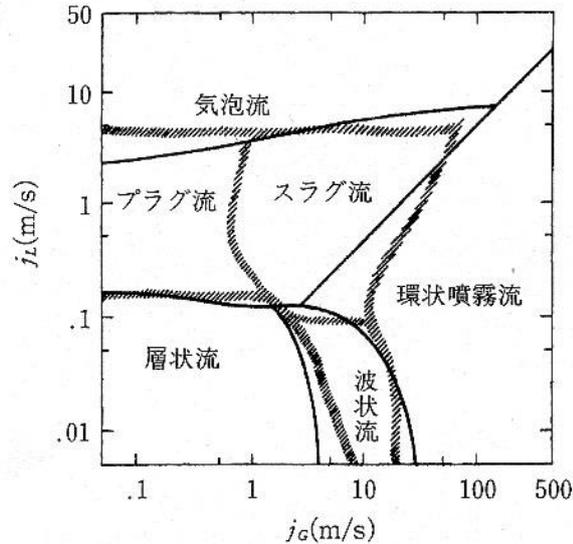


図 6.3.3 水平管内流における流動様式線図（空気－水系、管径 2.5cm）

細線：Taitel-Dukler による理論式、太線：Mandhane による実験式

（出典：日本混相流学会（2004））

### (4) 固液二相流

固液二相流は、後節で述べる管内における砂などの固体の移動や堆積と深い関係がある。液体中に微小な固体粒子が見かけ上ほぼ均一に分散した固液混合物をスラリー（slurry）と呼ぶ。固体をスラリー化し、ポンプなどで輸送する方法は水力輸送またはスラリー輸送と呼ばれ、土木工事、浚渫、鉱山などでも広く利用されている。図 6.3.4 に水力輸送システムのフローを示す。

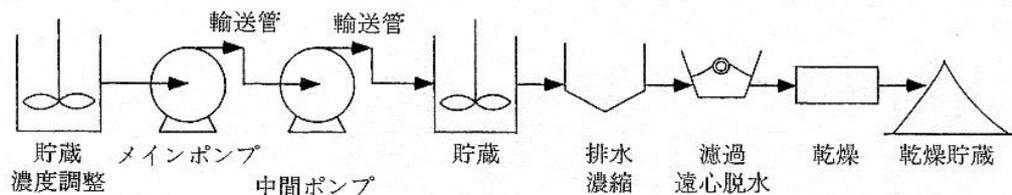


図 6.3.4 水力輸送システムのフロー

（出典：日本混相流学会（2004））

## 第6章 サブシーシステム

固液二相流では、主に固体粒子の動きに着目することが多い。液体中の粒子の運動を調べる上で、粒子が液体から受ける抵抗力  $F_D$  は重要である。静止液体中を運動する直径  $D_p$  の球形粒子が受ける抵抗力を次式に示す。

$$F_D = C_D \frac{\pi D_p^2}{4} \frac{\rho_f v^2}{2} \quad (6.3.5)$$

ここで、 $\rho_f$  は液体の密度、 $v$  は粒子の速度、 $C_D$  は抵抗係数である。 $C_D$  は  $Re$  の関数として以下のように表すことができる。

$$\begin{aligned} C_D &= \frac{24}{Re} \quad (Re < 6) \\ C_D &= \frac{10}{\sqrt{Re}} \quad (6 < Re < 500) \\ C_D &\cong 0.44 \quad (500 < Re < 105) \end{aligned} \quad (6.3.6)$$

この場合の  $Re$  は粒子に対する Reynolds 数で、次式で表される。

$$Re = \frac{D_p v \rho_f}{\mu} \quad (6.3.7)$$

これらの式から、抵抗力は以下のように表すことができる。

$$\begin{aligned} F_D &= 3\pi\mu v D_p \quad (Re < 6) \\ F_D &= \frac{5}{4}\pi \sqrt{\mu\rho_f} (v D_p)^3 \quad (6 < Re < 500) \\ F_D &\cong 0.055\pi\rho_f (v D_p)^2 \quad (500 < Re < 105) \end{aligned} \quad (6.3.8)$$

なお、式(6.3.8)は上段からそれぞれ Stokes の法則、Allen の法則、Newton の法則と呼ぶ。

重力下において液体中で運動する粒子には、抵抗力のほかに重力と浮力が作用する。重力と浮力は一定であるが、抵抗力は粒子の速度の増加とともに増大するため、ある一定の速度に達すると粒子の加速度はゼロとなり、以後は等速度で運動する。この速度のことを終端速度 (terminal velocity) と呼ぶ。式(6.3.6)を用いて、終端速度  $v_t$  は以下のように表すことができる。

$$v_t = \frac{g(\rho_p - \rho_f)D_p^2}{18\mu} \quad (\text{Re} < 6)$$

$$v_t = \left\{ \frac{4}{225} \frac{(\rho_p - \rho_f)^2 g^2}{\mu \rho_f} \right\}^{1/3} D_p \quad (6 < \text{Re} < 500) \quad (6.3.9)$$

$$v_t \cong \sqrt{\frac{3g(\rho_p - \rho_f)D_p}{\rho_f}} \quad (500 < \text{Re} < 105)$$

となる。ここで、 $g$  は重力加速度、 $\rho_p$  は粒子の密度である。

管内における固体の堆積などを取り扱うときには、終端速度が手がかりとなる。

### 6.3.3 伝熱

管内の温度は、流体の物性値の推算や、次節以降で述べるハイドレートやワックスなどの生成・成長・分解を予測するうえで重要な情報である。管内の温度を知るためには温度センサー等を用いて計測することが最も良いが、実際の計測には点数などの制約が付きものである。伝熱 (heat transfer) を理解することによって、少数の温度データから管内の温度分布を推定することが可能になり、断熱などの熱管理の設計が可能となる。

#### (1) 伝熱の種類

伝熱には、熱伝導 (heat conduction)、対流伝熱 (あるいは単に対流、convection)、輻射 (radiation) の3種類がある。熱伝導は、固体や静止している流体において、熱が高温側から低温側へと隣接する部分を伝わって移動する現象である。対流伝熱は、流体の移動 (流れ) によって熱が移動する現象である。対流伝熱には、温度差によって自然に流れが発生し、熱が移動する自然対流伝熱 (free convection あるいは natural convection) と、外力によって生じた流れによる強制対流伝熱 (forced convection) がある。例えば、高温の物体の周囲に冷却水を流して冷却することは強制対流伝熱の一例である。輻射は、熱が電磁波として物体から放射されることにより熱が移動する現象である。熱伝導と対流伝熱は物体が介在することによって熱が伝わる現象であるが、輻射の場合は、途中の空間が真空であっても熱が移動する。これらのうち、サブシーシステムで特に重要なのは熱伝導と対流伝熱である。

#### (2) 熱伝導

熱伝導の基礎となるのは Fourier の法則である。今、 $y$  軸方向に温度分布があると考えると、熱は高温側から低温側へと  $y$  軸方向に移動する。 $y$  軸に直交する単位面積あたりの熱の輸送速度を熱流束 (heat flux) と呼ぶ。熱流束  $q_y$  は Fourier の法則により次の式で表すことができる。

$$q_y = -k \frac{dT}{dy} \tag{6.3.10}$$

ここで、 $k$ は熱伝導度 (thermal conductivity) である。固体内の熱伝導は式(6.3.10)から求めることができる。

(3) 対流伝熱

対流伝熱では、熱の移動と流体の移動が同時に発生しているが、これらを同時に理論的に取り扱うことは困難である。実用的には、次式のように、単位面積あたりの熱の交換量は固体側と流体側の温度差に比例するとして計算することができる。

$$Q = h\Delta T \tag{6.3.11}$$

ここで、 $Q$ は熱交換量、 $\Delta T$ は温度差、 $h$ は伝熱係数である。伝熱係数は流動状態に応じて変化する。ここで、伝熱係数を求めるため、Nusselt 数 ( $Nu$ ) 及び Prandtl 数 ( $Pr$ ) という無次元数を導入する。これらは次の式で定義される。

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad Pr = \frac{C_p\mu}{k} \tag{6.3.12}$$

ここで、 $D$ は管径、 $C_p$ は定圧比熱容量である。Prandtl 数は流体の物性値のみからなる無次元数であり、物体の種類、温度、圧力等により決定される。代表的な気体及び液体の Prandtl 数を表 6.3.2 に示す。気体の Prandtl 数は 1.0 前後、液体の Prandtl 数は種類によって大きく変わるが、水では 1~10 のオーダーである。液体金属では Prandtl 数の数値は非常に小さい。

表 6.3.2 代表的な気体及び液体の Prandtl 数

ガ ス 体	温度, 圧力	$Pr$
空気, 単原子ガス	0°C, 1 atm	0.71
	100°C, "	0.69
CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub>	" "	0.79
NH <sub>3</sub>	" "	0.97
水蒸気	" "	1.12
液 体	温 度	$Pr$
水	0°C	14.0
	50°C	3.5
	100°C	1.6
エチルアルコール	20°C	16
硫酸 (98%)	20°C	150
エチレングリコール	0°C	600
水 銀	10°C	0.0217

(出典：水科，萩野 (1981) )

## 第 6 章 サブシーシステム

Nusselt 数は、Reynolds 数や Prandtl 数の関数として表すことができる。例えば、円管内層流の Nusselt 数は次式で表すことができる。

管壁温度一定の場合は、

$$Nu_{av} = 1.62(RePrD/L)^{1/3} \quad (6.3.13)$$

管壁熱流束一定の場合は、

$$Nu_{av} = 1.95(RePrD/L)^{1/3} \quad (6.3.14)$$

となる。ここで、 $L$  は管の長さである。また、 $Nu$  の添え字の  $av$  は、管長  $L$  の範囲での平均値であることを示す。どちらの場合でも、Nusselt 数は Reynolds 数及び Prandtl 数の  $1/3$  乗に比例する。図 6.3.5 に円管内層流における Nusselt 数を示す。

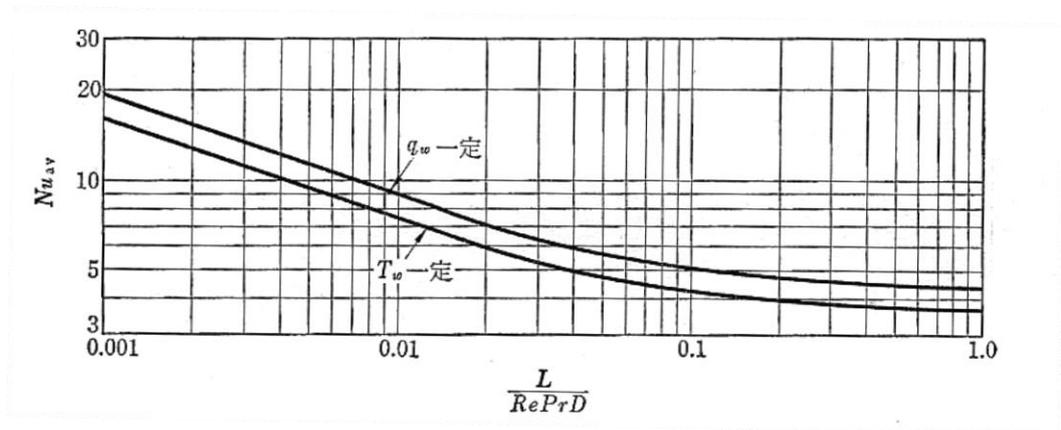


図 6.3.5 円管内層流の Nusselt 数

(出典：水科，萩野（1981）)

層流から乱流へと遷移する過程で伝熱係数の傾向は変化する。乱流の場合は伝熱係数を理論的に導くことはできないので、実験により得られた係数を用いる。図 6.3.6 に円管内流れの伝熱係数が Reynolds 数の変化に対してどのように変化するのかわを示す。

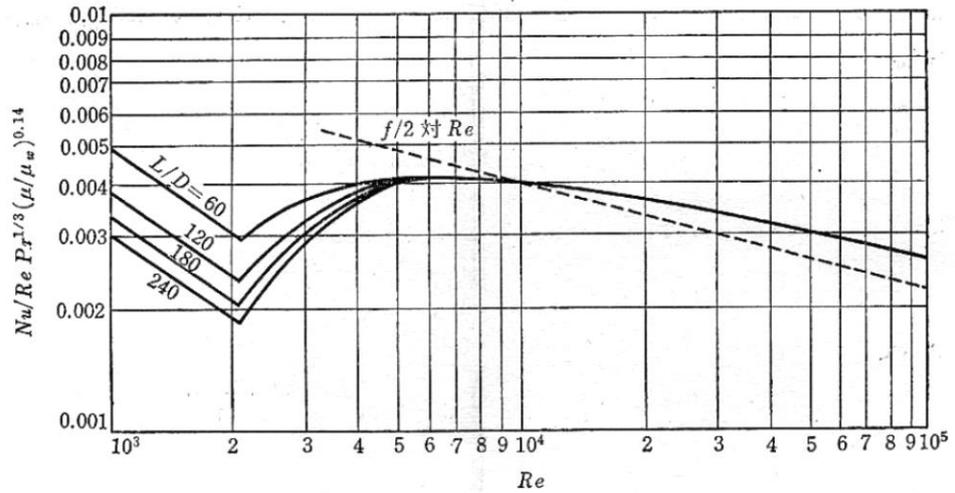


図 6.3.6 円管内流れの伝熱係数

(出典：水科，萩野（1981）)

図 6.3.7 に Prandtl 数をパラメータとして変化させた場合における円管内乱流の Nusselt 数の計算結果の例を示す。

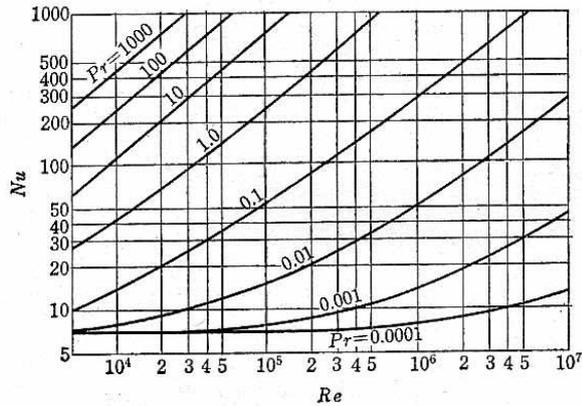


図 6.3.7 円管内乱流の Nusselt 数の計算結果の例

(出典：水科，萩野（1981）)

このほか、凝縮や沸騰などの相変化を伴う伝熱に対しては、凝縮伝熱係数や沸騰伝熱係数が提案されている。

### 6.3.4 ハイドレート

低温・高圧となるガスパイプラインの内部に氷のような物質が生じ、それが成長して管内を閉塞させる現象は 1930 年代から知られていた。この氷状の物質は、クラスレート・ハイドレート (clathrate hydrate：包接水和物) と呼ばれる物質の一種である。クラスレート・ハ

## 第6章 サブシステム

イドレートとは、水分子が形成する分子サイズの籠状構造（ケージ）の内部にメタンやプロパンなどの分子が閉じ込められた結晶構造を有する物質である。閉じ込められる分子（ゲスト分子）には、メタンやプロパンなどの炭化水素をはじめ、酸素や窒素、二酸化炭素、アルゴンなど様々である。通常、常温常圧で気体となる分子をゲスト分子として閉じ込めたクラスレート・ハイドレート（ガスハイドレート）と呼ぶ（常温常圧で液体となる分子を閉じ込めたクラスレート・ハイドレートも存在する）。なお、複数種の分子をゲスト分子として含むクラスレート・ハイドレートも存在する。フローアシュアランスの分野で特に重要なのはメタンをゲスト分子とするメタンハイドレートである。以下、本稿ではメタンハイドレートのことを単にハイドレートと記す。

### (1) ハイドレートの構造

メタンハイドレートの結晶構造の概略を図 6.3.8 に示す。メタン分子を包含するケージには大小 2 種類があり、いずれも水分子同士の水素結合によって形成されている。理想的な結晶構造では、各ケージに 1 個のメタン分子が含まれている。

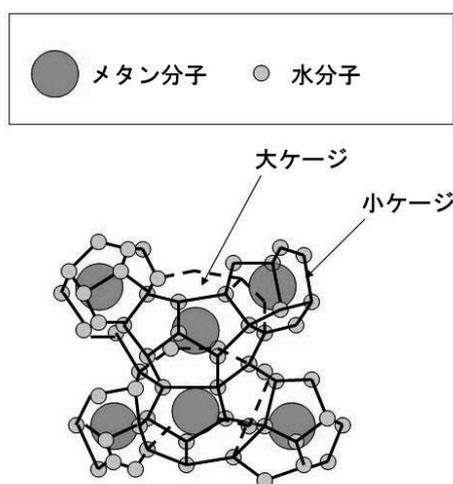


図 6.3.8 メタンハイドレートの結晶構造の概略

### (2) ハイドレートの生成・分解とその制御

ハイドレートの生成・分解条件は、温度・圧力線図上の曲線で示される。この条件は、熱力学的には 1 本の曲線であるが、実際には生成曲線と分解曲線に解離している。図 6.3.9 にハイドレートの生成・分解領域を示す。例えば、一定の圧力で高温側から徐々に冷却していくと、分解曲線を越えてさらに生成曲線と交差するあたりでハイドレートが生成する。一旦生成したハイドレートを分解させる場合は、分解曲線と交差する温度まで昇温させる必要がある。一方、一定の温度において低い圧力から徐々に圧力を高めていくと、生成曲線と交差する圧力においてハイドレートが生成する。一旦生成したハイドレートを分解させる場合は、分解曲線と交差する圧力まで減圧する必要がある。

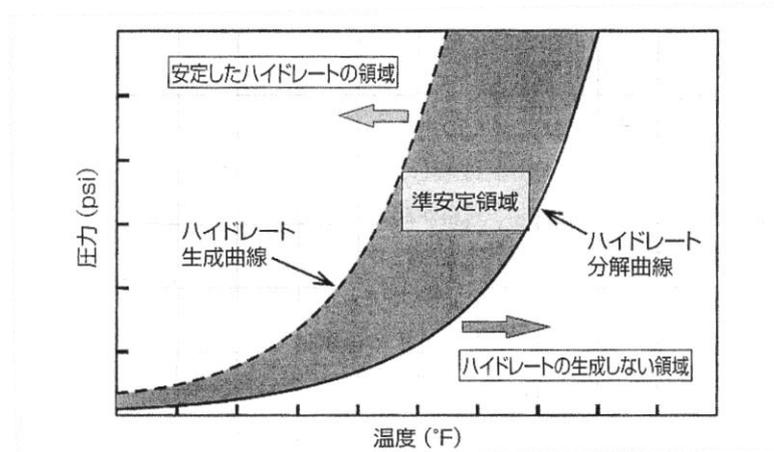


図 6.3.9 ハイドレートの生成と分解の領域

(圧力の単位の psi は pound/square inch を、温度の単位の ° F は華氏を示す)

(出典 : Bai, Bai (2016))

管路内でハイドレートが生成し、管を塞ぐほどに成長すると、その処理は困難なものになる。最も根本的な対策は、管内の温度・圧力条件をハイドレートの生成しない領域に保持することと、ガス中の水分を完全に除去することである。しかし、実際には困難な場合もあるため、これ以外にもハイドレートの生成を防止する、または成長を抑制するための様々な方法が考案されている。これらをハイドレート抑制技術と呼ぶ。図 6.3.10 に各種のハイドレート抑制技術を示す。B は、熱力学的抑制剤の添加により、ハイドレートの生成・分解曲線を管内の温度・圧力条件よりも低温・高圧側にシフトさせる方法である。C は、ハイドレートが発生する温度・圧力条件において結晶生成を阻害する、結晶化抑制剤を添加する方法である。D は、ハイドレートの生成そのものを抑制するのではなく、生成したハイドレートが凝集することを抑制する凝集抑制剤を添加する方法である。

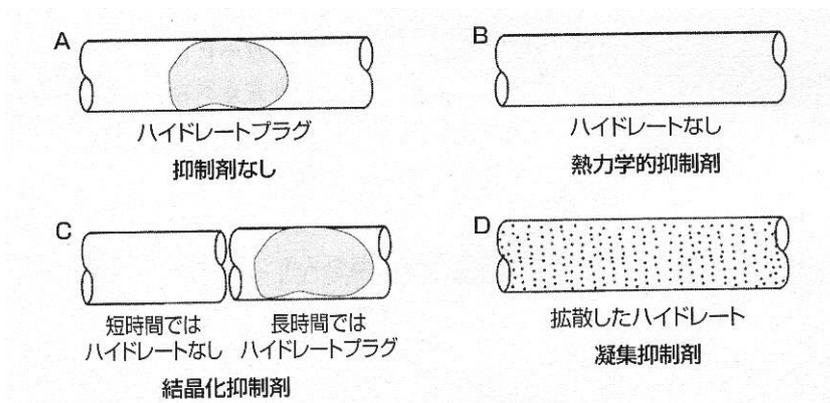


図 6.3.10 各種のハイドレート抑制技術

(出典 : Bai, Bai (2016))

## 第6章 サブシステム

熱力学的抑制剤の代表的なものとして、メタノールが挙げられる。図 6.3.11 にハイドレート生成に及ぼすメタノールの影響を示す。メタノール添加率の増加に伴って、生成曲線が低温・高圧側にシフトしていることがわかる。

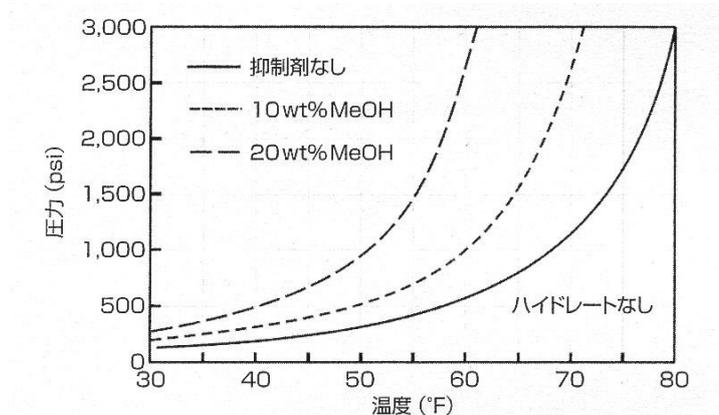


図 6.3.11 ハイドレート生成に及ぼすメタノールの影響

(出典 : Bai, Bai (2016))

### 6.3.5 ワックスとアスファルテン

原油には様々な有機化合物が含まれているが、特に分子内の炭素-炭素の結合が長く伸びた長鎖アルキル化合物はワックスやパラフィン (paraffin) と呼ばれる。一般に、長鎖アルキル化合物は炭素-炭素の結合が長くなるにつれて融点が上昇する (液体から固体への変化がより高い温度において発生する。なお、ワックスは様々な分子の混合物であるため、融点ではなく曇り点や流動点などの温度が固化の指標値として用いられる)。これらの物質は高温では原油中に溶け込んでいるが、温度が下がるにつれて液体の状態を維持できなくなり、固化・析出して管の内壁などに付着し、ワックス層を形成する。管内温度よりも管外温度が低い場合は、管内から管外へ向けて熱が移動し、壁面付近で温度勾配が生じるため、ワックス層が形成されやすい。ワックス層が形成されて管壁付近の液体内からワックス成分が除去されると、流れの中心に近い層からワックス成分が拡散し、さらに析出してワックス層が厚くなる。ワックス層の成長とともに流路が狭隘化し、閉塞を引き起こす原因となる。ワックス層形成のメカニズムの支配的な要因が伝熱 (冷却) と拡散であることに基づき、いくつかのワックス層形成のモデル (Tulsa 大学モデル、OLGA ワックスモジュール、BPC モデル) が提案されている。

ワックス層の形成を抑制するためには、断熱・加熱、抑制剤の注入、管路内のピギング (pigging) などの方法が採用されている。断熱・加熱では管路内を全体において曇り点以上の温度に維持し、ワックスの固化を防止する。抑制剤としては、熱力学的ワックス抑制剤、流動点降下剤、分散剤、界面活性剤、結晶改質剤などの様々なものがあるが、一般に、ピギングよりも高コストとされる。ピギングは、ピグと呼ばれる物体を管路内に通す操作である。ピグの形状としては、管の内径とほぼ同じ径の円盤を複数つないだ形、砲弾形、球形等、様々である (図 6.3.12 参照)。



図 6.3.12 ピグの例

(出典：T.D. Williamson 社ウェブサイト)

ピギングにより、管路内にたまっているものを排出することができるため、適切な周期でピギングを行うことが重要である。その一方で、ピギング中及びその直後の管路内流動特性は通常の実操作時とは異なっており、ピギングの周期を決定するためにも、ピギング中の流れの状態を知ることは重要である。ピギングにおける管内状況のモデルを図 6.3.13 に示す。ピグの前方にはこれまでに押し出された液体などがスラグ状にたまっていることがわかる。また、ピギングにより管路出口からは液体スラグが排出されるため、出口にはスラグキャッチャーなどの液体処理設備を設ける必要がある。

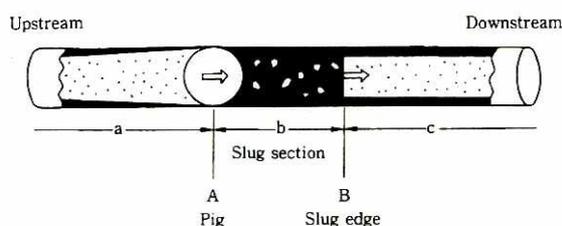


図 6.3.13 ピギングにおける管内状況のモデル

(出典：幸田 (1999) )

一旦形成されてしまったワックス層を除去する方法としては、高温流体の循環や電気による加熱、機械的な削り取り、熱化学的洗浄、薬品の注入がある。加熱は、ワックスの流動点以上に加熱するもので、ダウンホールや短い管路には適している。高温流体としては、油、水、蒸気が用いられる。機械的な削り取りとしては、ピギングやコイルドチュービングが挙げられる。熱化学的洗浄は、窒素発生システム (NGS) を用いて、熱的、化学的、機械的な作用を組み合わせ、ワックス層に可逆的な流動性を持たせる方法である。薬品としては、溶剤、分散剤、結晶改質剤等が使用される。

## 第6章 サブシーシステム

アスファルテンは、芳香環を中心とした複雑な構造を有する有機化合物である。一般には、黒色で  $n$ -ヘプタンに溶解しない原油中の一連の化合物の総称である。アスファルテンの分子構造を正確に解析することは困難であり、物性試験などから推定される。仮想的なアスファルテン分子構造の例を図 6.3.14 に示す。分子中には窒素原子や硫黄原子のほか、ニッケルやバナジウムなどの金属元素の原子を含むこともある。

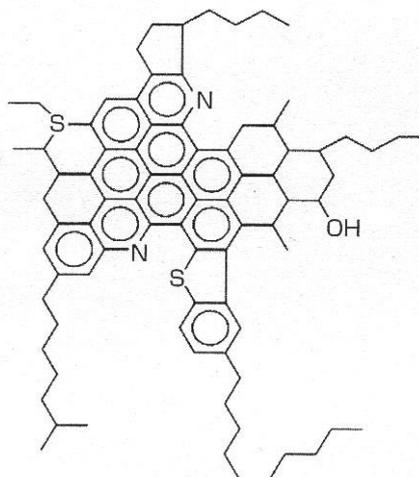


図 6.3.14 仮想的なアスファルテン分子の構造

(出典 : Bai, Bai (2016))

アスファルテンは原油中で安定的に存在するが、不安定化により管路内で析出・堆積し、閉塞を引き起こす。アスファルテンの凝集及び沈殿の指標となるのは凝集点 (floculation point) と呼ばれる圧力である。油井の圧力変化と原油性状の変化 (脂肪族炭化水素の堆積分率の増大) がアスファルテンの不安定化を引き起こすことが知られている。

アスファルテン堆積物は粘着性を有しており、その除去はワックスよりも難しく、困難である。また、ワックスやハイドレートのような堆積モデルもまだ確立していない。現状では、アスファルテンの堆積を抑制する方法としては、坑井への分散剤や溶剤の注入、コイルドチュービング、ピギングなどが行われている。一旦生成したアスファルテン堆積物の除去には、コイルドチュービング、加圧や圧力パルスの発生による破壊などが行われている。

### 6.3.6 腐食とスケール

腐食は電気化学的な現象である。腐食の進行により管に穴があくことや、管の肉厚が徐々に減少して最終的に破損する恐れがあるため、腐食の防止・抑制 (防食) は重要な課題であり、腐食のメカニズムも含めて古くから研究されている。

腐食の起こりやすさを示す指標となるのは電位ポテンシャルである (本稿では、電位ポテンシャルの高い/低いという表現については、高い方が低い方よりも不安定で腐食反応が進みやすい、という意味で使用する)。電位ポテンシャルの異なる物質が接触すると電位の高い

## 第6章 サブシーシステム

物質が電子を失ってイオン化し、腐食される。この現象をガルバニック腐食と呼ぶ（図 6.3.15 参照）。異種金属が接触している部分は局部電池とも呼ばれ、ガルバニック腐食が起こりやすい。

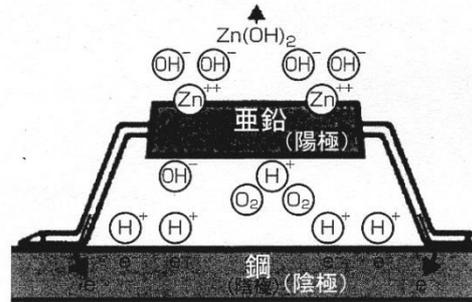


図 6.3.15 ガルバニック腐食の原理

(出典 : Bai, Bai (2016))

サブシーシステムで主に取り扱う管の腐食には、外気や海水にさらされる管の外側の腐食と、原油や天然ガスなどの内部を流れる流体に含まれている二酸化炭素 ( $\text{CO}_2$ ) や硫化水素 ( $\text{H}_2\text{S}$ ) などの成分に起因する内側の腐食がある。硫化水素の分圧が 0.05psi 未満で二酸化炭素が主として存在している場合はスイート腐食 (sweet corrosion)、0.05psi 以上の硫化水素と二酸化炭素が存在している場合はサワー腐食 (sour corrosion) と呼ばれる。

防食には塗装や表面処理も有効であるが、より積極的な方法として電気防食 (カソード式防食、cathodic protection) もある。実際にはこれらの組合せが用いられる。電気防食の原理を図 6.3.16 に示す。ワイヤーを介してガルバーニ陽極をパイプ (陰極) と連結し、パイプの電位ポテンシャルを腐食ポテンシャルよりも低くすることにより、パイプの腐食を防止する。この場合の陽極は犠牲陽極と呼ばれる。電気防食において流す電流は電流密度 (単位面積あたりの電流) の基準値に応じて決定される。電流密度の基準値は、海域の海水条件や、管が堆積物で埋められているかどうかに応じて決められるが、各種の認証団体等が示す推奨値が用いられることが多い。

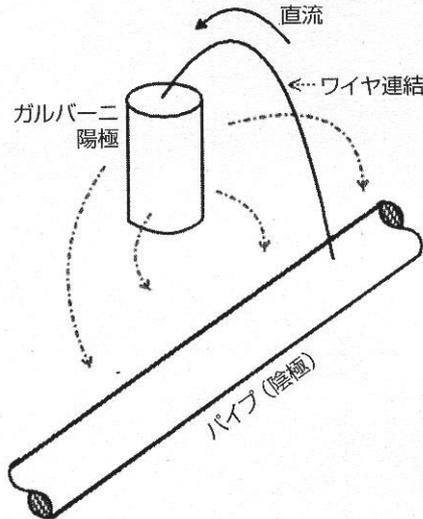


図 6.3.16 パイプラインにおける電気防食

(出典 : Bai, Bai (2016))

スケールとは、もともと水（生産水）に含まれていた無機物が管壁などに析出・付着したものである。水中にはカルシウム、ストロンチウム、バリウムなどの様々な無機物がイオンの形で溶解しており、温度や圧力の変化、あるいはある種の化学反応で析出する。一般に、無機物は高温では水に溶解するが、高温部などでは水分の蒸発に伴って溶けきれなくなった無機物が析出するケースもある。スケールの発生・成長は管路閉塞の原因となる。

主なスケールは、カルシウム、ストロンチウム、バリウムなどの炭酸塩や硫酸塩である。炭酸カルシウムは油・ガス田では最も一般的なスケールであり、全ての地域で生成する。硫酸カルシウムは、それ自体が油田のブライン（塩水）中に含まれていることもあるが、生産水中のカルシウムイオンと海水中の硫酸イオンの反応で生じることもある。硫酸バリウムは水に非常に溶けにくく、一旦スケールとして付着すると除去が困難である。

スケールの対策としては、スケール抑制剤を用いて発生自体を防ぐ、発生したスケールを酸などの除去剤を用いて除去する、溶解・浮遊した固体を取り除く等の方法がある。

### 6.3.7 浸食と砂

管の浸食とは、管が少しずつ削られていく現象である。浸食には、微粒子（砂など）による浸食、液滴による浸食、腐食摩耗、キャビテーションによる浸食がある。浸食により管が破損する恐れがあるため、浸食の防止は重要である。以下、本稿では砂などの粒子による浸食について記す。

粒子は固体であるので、粒子を含む流れは混相流（固液、固気または固気液）である。粒子は流体とともに管内を流動するが、慣性力を有しているために管壁との衝突が生じる。特に、エルボなどの流れの方向が急激に変化する箇所、チョークやバルブなどの流れが狭隘になる箇所では衝突が起こりやすく、浸食も進みやすい。図 6.3.17 にエルボを通過する粒子の

## 第6章 サブシーシステム

移動経路を示す。小さな粒子は流体とともに移動するが、粒径の増大とともに管壁への衝突が増大し、また慣性力が大きなことから1回の衝突における浸食も大きくなる。粒子の形状や硬度も浸食に影響する。このような衝突が重なることにより浸食が進行する。また、浸食と腐食が複合的に進行する腐食摩耗と呼ばれる現象も生じる。

浸食を防止する方法としては、砂などの粒子の管内からの除去（侵入防止を含む）、または固定する方法と、管内流動の流速自体を制限する方法が挙げられる。砂の除去には、スクリーンやフィルター、グラベル（礫）パックなどの機器が使用される。砂の固定には、化学剤が使用される。流速の制限は、石油・ガスの生産速度自体の制限でもあるが、流体臨界速度よばれる制限値以下に制限することにより、浸食を許容範囲内に抑制するという方法である。

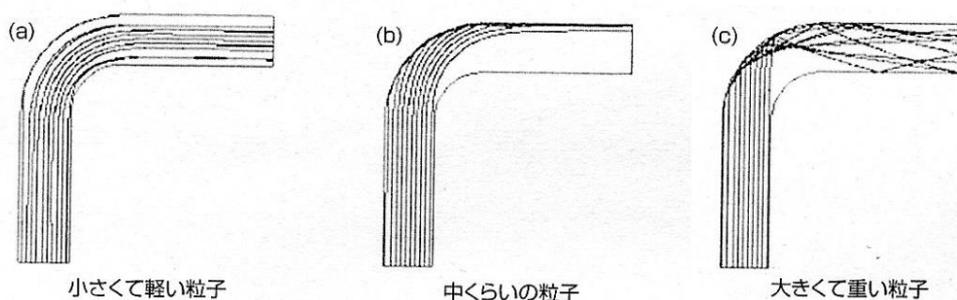


図 6.3.17 エルボを通過する粒子の移動経路

(出典：Bai, Bai (2016))

### 6.4 ROV・AUV

#### 6.4.1 概要

石油・ガス田の探査、開発、生産段階において、無人潜水機（UUV: Unmanned Underwater Vehicle）のうち、有索や無索で遠隔操作可能な探査機である ROV が多く用いられている。ROV には、各種観測機器を搭載したものや、機器の設置、回収等の作業を行うためのマニピュレータを搭載したものなど、用途によりサイズや搭載機器が異なる。

一方、無索で自律機能を有する潜水機は AUV と呼ばれ、設置、回収等の作業を行うのではなく、主に海中、海底の環境や設置機器の観測に利用されている。

#### 6.4.2 ROV

ROV は 1953 年に実験的な機種が米国で作られ、1960 年代に入って実用化された。この実用機は、1965 年に米国海軍の兵器試験施設（Naval Ordnance Test Station）で魚雷回収用として開発された CURV-1（Cable-controlled Underwater Recovery Vehicle）である。

1973 年、第一次石油危機により石油価格が高騰し、海底石油開発・生産が活発化し、その後、開発深度が増すにつれて、安全性及び経済性の観点から、潜水士、有人潜水機に代わり ROV の利用が増加した。表 6.4.1 に ROV と潜水艇操縦者の変遷を示す。

表 6.4.1 ROV と潜水艇操縦者の変遷

	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993
Submergible Pilots	70	67	50	34	28	23	16	3	3	4	8
ROV Pilots	225	245	279	282	355	323	282	324	412	394	514
Other Offshore Support Personnel	140	167	128	127	104	73	114	50	69	168	112
TOTAL	435	479	457	443	487	419	412	377	484	566	634

(出典：JOGMEC(2016))

ROV は、洋上の支援施設（支援母船等）から推進用動力や制御・通信信号などがテザーケーブル（tether cable）、またはアンビリカルを通じて供給伝達される（有索）。洋上の支援施設とビークルの間には、中継器を有するものとそうでないものが存在する（図 6.4.1）。表 6.4.2 に中継器の有無による利点と難点を示す。



図 6.4.1 中継ランチャー有無のイメージ事例

(左図ハイパードルフィン、右図かいこう 7000 II)

(出典：JAMSTEC ウェブサイト)

## 第6章 サブシーシステム

表 6.4.2 中継器の有無による利点と難点

	中継器無し	中継器有り
利点	<ul style="list-style-type: none"> <li>・アンビリカルケーブルを一本だけ用いるため、システムが簡単</li> <li>・ビークルの行動範囲が広い</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・潮流力は中継器が受け持つため潜航が容易</li> <li>・キンクの発生も回避できる</li> </ul>
難点	<ul style="list-style-type: none"> <li>・アンビリカルケーブル全てをビークル自身が潮流力に抗して牽引する</li> <li>・アンビリカルケーブルにかかる張力がビークル付近でほぼゼロになるため、ケーブルのキンクが発生しやすくなる</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・中継器分揚収装置に負担がかかり、システムも複雑となる</li> <li>・ビークルの行動範囲が中継器を中心とした二次ケーブル(中継器-ビークル間のケーブル)の長さに限られる</li> </ul>

(出典：浦、高川(1997)より作成)

なお、大水深用の ROV には、潜航の容易さから中継器を有する場合が多く、同時に中継器を単なるおもりとしてではなく、曳航型調査機器としての役割を果たすものもある。

洋上の支援施設とビークルを繋ぐアンビリカルケーブルは、電力送電機能、遠隔操縦信号の伝達、センサー情報の伝達の役割を担う。信号伝達には光ファイバーが用いられ、図 6.4.2 に示すような基本構造を有している。

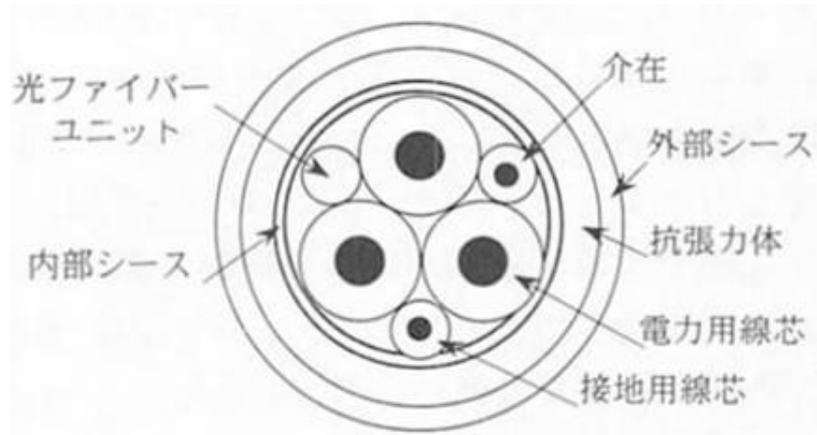


図 6.4.2 アンビリカルケーブルの基本構造

(出典：浦、高川(1997))

海洋の油ガス田開発の初期においては、カメラのみを搭載し、ダイバー作業時の安全確保等の補助的用途として用いられた(米国ハイドロプロダクツ社 RCV-225 等)。その後、大型でマンピュレータを装備したオープンフレーム型構造の商用 ROV が開発、利用されている(図 6.4.3 参照)。

マンピュレータを装備した ROV により、海中・海底構造物へのパイプライン/アンビリカルケーブルの接続、パイプラインの修理、部品の交換、バルブ操作、流体注入、破片の除去などの海底作業の支援を行っている。

## 第6章 サブシーシステム



図 6.4.3 ROV の事例 (左図 : RCV-225 及び RCV-150、右図 : Millennium® Plus)

(出典 : 左図 R.L. Wernli ら(2009), 右図 Oceaneering International 社ウェブサイト)

ROV のマニピュレータは、作業用途により多種多様な形状を有しており、ジョイスティック等で容易に操作可能な構造となっている。操作性を向上させるため、マスター・スレーブ方式等様々な制御機構が開発されている。一つの理想として人間の腕と同じ自由度で動き、操作員が現場にいるのと同じ臨場感を与える技術としてテレグジスタンス (telexistence) 技術といった視覚、力覚、触覚等様々なセンサー情報を総合した技術がある。また、人間がマニピュレータをリアルタイムで操作するのではなく、海中ロボット自身が有する自律機能により操作する技術の開発も行われている。

### 6.4.3 AUV

AUV とは、自律機能を備えた無索無人海中ロボットを称する。1950 年代にワシントン大学にて Special Purpose Underwater Research Vehicle (SPURV1) が開発された。SPURV1 は水深 3,000m、速度 4-5 ノット、4 時間の自律航行能力を有していた。1970 年代には MIT にて多くの AUV が研究され、2000 年以降に軍用、学術用、油ガス田分野での需要が拡大し製造された。各国のプロトタイプのアUV 開発事例を表 6.4.3 に示す。

ダグラス・ウエストウッドによる近年における AUV の市場動向について図 6.4.4 に示す。2016~2020 年は推移予測であり、Commercial は油ガス産業での需要である。軍用及び油ガス産業で AUV の需要が増加するとの予測を示している。

表 6.4.3 各国のプロトタイプのアUV 開発事例

海中ロボット	開発機関	長さ (m)	重量 (kg)	潜航深度 (m)	電源	実海域試験
ABE	WHOI	3,050	544	6,000	Pb	1994
ARCS	ISE	5,200	1,360	300	Ni-Cd	1984
AUSS	NOSC	4,260	1,300	6,000	Ag-Zn	1983
AUTOSUB/-1	NERC	7,000	1,400	6,000	Pb	1996
EPAULARD	IFREMER	4,000	2,910	6,000	Pb	1979
MT-88	ACAD. SCI.	3,800	1,000	6,000	Pb	1989
MUST	MARTIN MARIETTA	9,000	8,800	600	Pb	1988
PTEROA 150	東大生研	1,500	220	2,000	Ni-Cd	1990
R-one Robot	東大生研 / 三井造船	8,270	4,350	400	CCDE	1995
XP-21	ART	4,880	550	600	Pb	1988

(出典 : 浦、高川(1997))

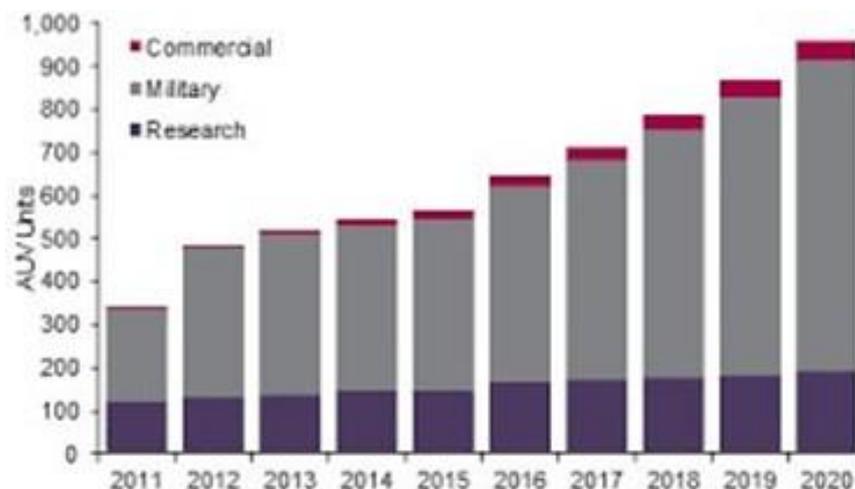


図 6.4.4 分野別の AUV 市場動向

(出典：SPE ウェブサイト)

海洋の石油生産では、パイプラインの設置海域、敷設ルート of 調査の他に次のような設備の検査に AUV が使用されている。

- 1) パイプライン、フローライン、アンビリカル、電力ケーブル
- 2) クリスマスツリー、マニフォールド
- 3) ライザー、係留システム
- 4) プラットフォームなどの構造物

また、AUV は、運用用途により航行型とホバリング型に大別される。主に、広域調査には航行型が、狭域調査には定点保持が可能なホバリング型が用いられる。

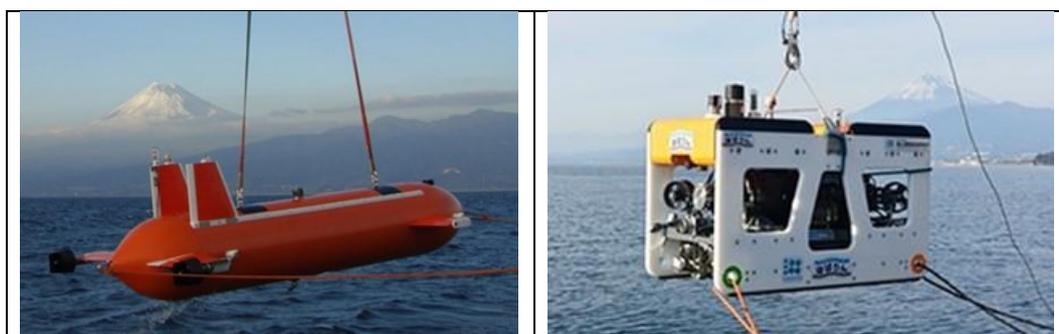


図 6.4.5 航行型及びホバリング型 AUV の事例

(出典：金(2018))

AUV の課題の一つに、長時間運用がある。長時間運用を実現するための必要なエネルギーを装備するためには、AUV の大型化となり、運用コストが増加することになる。このため、

## 第6章 サブシーシステム

省エネルギー技術・小型化、バッテリーの開発や水中で電力補充などの研究が進められている。

### 6.5 まとめ

本章では、サブシーシステムを構成する各種機器の特徴、フローアシュアランスの基礎、そしてサブシー作業のための ROV と AUV について記載した。サブシーの現場では、実績の豊富な確立された技術が好まれる傾向があるが、近年の原油価格の低迷もあり、コスト削減を目的とした新しい技術も導入されつつある。サブシーシステムを学ぶ際には、これまでに確立された技術を理解し、習熟するとともに、新しい技術についても学ぶ姿勢が求められる。

## 第6章 サブシーシステム

### <参考資料>

- Bai, Y.; Bai, Q. 尾崎雅彦監訳. サブシー工学ハンドブック①サブシー生産システム. 海文堂, 2016, 391p.
- Bai, Y.; Bai, Q. 尾崎雅彦監訳. サブシー工学ハンドブック②フローアシュアランスとシステムエンジニアリング. 海文堂, 2016, 275p.
- 石油天然ガス・金属鉱物資源機構 (JOGMEC). 海洋工学ハンドブック. 2016. 第6版.
- 田村兼吉ほか. 大水深ライザーシステムの安全性に関する研究. 海上技術安全研究所報告. 2007, 第7巻, 第3号, p.305-367
- 新井博久. 最新の海洋油ガス田開発動向についての紹介. 石油・天然ガスレビュー. 2011, Vol.45, No.4. p.71-92.
- 石油天然ガス・金属鉱物資源機構 (JOGMEC). 海洋工学ハンドブック. 2016. 第6版.
- National Geographic 社. "海の探検隊 JAMSTEC. Web National Geographic 日本版". National Geographic 社  
<https://natgeo.nikkeibp.co.jp/nng/article/20131106/371949/?P=6> (cited 2020-12-31)
- TRELLEBORG OFFSHORE. "Drilling and syntactic products". TRELLEBORG OFFSHORE. <http://www.trelleborg.com/offshore/~media/offshore/images--and--product--sheets/resources/november--2016--updates/trelleborg-offshore-drill-riser-logs.pdf> (cited 2020-12-31)
- Oil and gas technologies. "Hybrid risers".  
<https://oilandgastechologies.wordpress.com/2012/09/01/hybrid-risers/> (cited 2020-12-31)
- Nnamdi Onochie Chibueze et al; "On the Fatigue of Steel Catenary Risers". - Journal of Mechanical Engineering 62(2016) , 2016.
- RIGZONE. "How Do Risers Work?". RIGZONE.  
[https://www.rigzone.com/training/insight.asp?insight\\_id=308](https://www.rigzone.com/training/insight.asp?insight_id=308) (cited 2020-12-31)
- Claudio Paschoa. "Deepwater Riser Technology ", Marine Technology News. 2014-06-24. <https://www.marinetechologynews.com/blogs/deepwater-riser-technology-700487> (cited 2020-12-31)
- Curt Giambattista et al. "Flowline design enables deepwater production offshore Africa". Offshore Magazine.2012-12-01. <https://www.offshore-mag.com/subsea/article/16760063/flowline-design-enables-deepwater-production-offshore-africa> (cited 2020-12-31)
- 水科篤郎; 荻野文丸. 輸送現象. 産業図書, 1981, 349p.
- 日本混相流学会編. 混相流ハンドブック. 朝倉書店, 2004, 502p.
- T.D. Williamson 社ウェブサイト. <https://www.tdwilliamson.com/solutions/integrated-pigging/pipeline-pigs> (cited 2021-2-3)
- 幸田和郎. パイプライン内の気液二相流における圧力, 流量変動, およびピギングに伴う過渡状態解析. 石油学会誌. 1999, vol. 42, no. 5, p. 275-286.
- JAMSTEC. "研究船・探査機". JAMSTEC.  
<https://www.jamstec.go.jp/j/about/equipment/ships/index.html>, (cited 2020-12-31).
- 浦環; 高川真一. 海中ロボット. 成山堂書店, 1997.
- Wernli, Robert L.; Christ, Robert D. Observation Class ROVs Come of Age. Sixth International Symposium on Underwater Technology (UT2009), 2009.

## 第6章 サブシーシステム

- Oceaneering International 社ウェブサイト. [https://www.oceaneering.com/rov-services/rov-systems/?mod=article\\_inline](https://www.oceaneering.com/rov-services/rov-systems/?mod=article_inline) (cited 2021-2-3)
- Oil and Gas facilities. “AUVs Gain Momentum in Oil and Gas Operations”. SPE. <https://www.spe.org/en/ogf/ogf-article-detail/?art=2031>, (cited 2020-12-31).
- 金 他. 次世代海洋調査の新戦略：複数 AUV 同時展開による高効率・高精度な海洋調査の実現に向けて. 平成 30 年海上技術安全研究所研究発表会. 2018
- Font, Davinia et al. Design and Implementation of a Biomimetic Turtle Hydrofoil for an Autonomous Underwater Vehicle. *Sensors* 2011. P.11168-11187. doi:10.3390/s111211168.
- Vukić, Zoran; Mišković, Nikola. State and Perspectives of Underwater Robotics- Role of Laboratory for Underwater Systems and Technologies. *Pomorski zbornik Posebno izdanje*, 2016, p.15-27.

## 7 海洋構造物の設計

### 7.1 はじめに

海洋資源開発や海洋再生可能エネルギー開発において、水深が浅い場合は海底設置型の設備を用いて開発が行われるが、水深が大きくなるにつれて、浮体式の海洋構造物が必要となる。これらの海洋構造物で用いられる全ての資機材は各種基準などを満足していることが求められる。特に石油・ガス開発における事故はその影響・被害が甚大になることが多く、設計・建造（製造）・施工・運用など各段階において国際的に統一された規則・基準を満足することが求められている。

そこで、本章では、海洋構造物の設計の進め方および各種基準を満たしていることを示す認証を取得するための進め方について概説する。

### 7.2 設計フロー

FPSO の設計手順の概略を図 7.2.1 に示す。

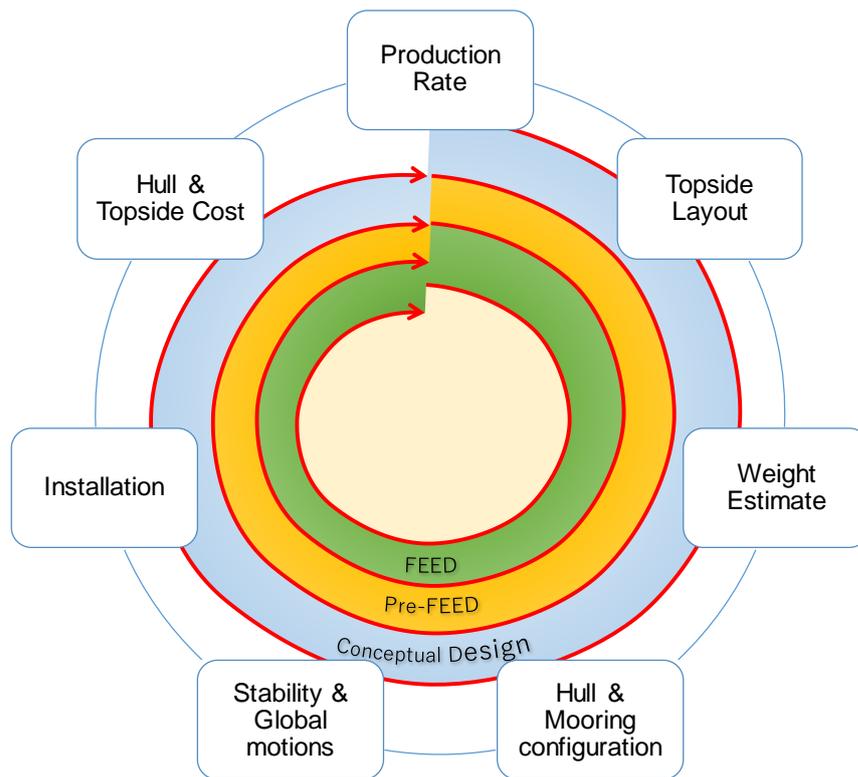


図 7.2.1 FPSO の概略デザインスパイラル

はじめに「production rate」を設定する。これは、物理探査や試掘から得られた油ガス層の特性（構造）から可採埋蔵量を推定し、経済面などを踏まえて年間生産量を設定する。

年間生産量が決まると、FPSO に上がってくる油ガス量が決まり、これに基づきトップサイド (topside) と呼ばれる FPSO 上の機器の種類や大きさ等を選定し、機器類の船上での配置を

## 第7章 海洋構造物の設計

決定し (topside layout)、重量分布を計算する (weight estimate)。

Topside layout や重量分布を考慮して浮体サイズを決定し、係留方法を決定 (hull & mooring configuration) し、浮体の復原性や波浪中での動揺を推定し、安全面等で問題が無いかなどのチェックを行う (stability & global motions)。

このとき、波浪中での動揺 (浮体の運動) の評価を行うには、第3章で示したような自然環境条件を把握し、再現期間を踏まえた「自然環境設計条件」を策定しておく必要がある。策定した自然環境の設計条件における浮体の動揺を第4章で示したような手法に基づいて行い、浮体そのものがどの程度揺れるのか、また、第5章で示した位置保持システムが十分な安全率を確保して機能するか、を確認する。

また、浮体のみならずライザーシステムなど、海中・海底面に設置する機器についても同様に安全性評価を行う。

次に、先に検討した浮体・係留システムをどのように海域に設置するかを検討を行い (installation)、FPSO のコスト試算を行う (hull & topside cost)。

上記のデザインスパイラルは少なくとも3周程度は回すことになる。1周目は「概念設計 (conceptual design)」と呼ばれる段階であり、2周目が「予備設計 (Pre-FEED (Front End Engineering and Design))」と呼ばれる基本設計の前段、3周目は「基本設計」や「FEED」と呼ばれる段階である。この基本設計のあとは「詳細設計」に移行するため、全体として設計を見直す段階ではなくなる。この各設計段階において、各種基準やルールに基づいているかどうかの確認を船級協会などの第三者が行うこととなる。

### 7.2.1 概念設計

概念設計は、開発そのものの実現可能性の検討を行うための概略的な設計である。そのため、開発に用いる機器類の詳細な設計は行わず、技術的に実現可能かどうか、また経済的にどの程度の費用がかかるのかの概算を把握するために実施する。

### 7.2.2 予備設計

予備設計は概念設計を受けて、実現性を精査し担保するための設計であり、どのような開発システムを用いて開発を行っていくのか、を決定する段階となる。

この段階において開発システムは後述する IMO や ISO 等の該当する基準・規格の要件を満たしておく必要がある。また、システムが潜在的に持つ事故発生に関するリスクについて評価し、その対応策を検討しておく必要がある。

### 7.2.3 基本設計

基本設計は最終的に投資決定を行うために実施する段階での設計であり、この後に行う詳細設計に必要な要求事項など決定する。本段階においても、予備設計段階と同様にリスク評価を行い、リスクの要因を取り除く設計に変更する必要がある。この基本設計を元にして、詳細設計 (detail engineering) を行い、設計した各機器類を調達 (procurement) するとともに、浮体等の建造・建設 (construction) を実施し、開発海域に設置・据え付け (installation) を行う「EPCI」の段階へと移行するため、この FEED までにおける設計は非常に重要とな

## 第7章 海洋構造物の設計

る。

上述のように各設計段階においては、設計するシステムが開発に必要な機能要件を満足することはもとより、

- ・ 基準・規格を満たしていること
- ・ 事故などにつながるリスクを可能な限り排除していること

が重要となる。

以下にこれらの基準・規格およびリスク解析について記載する。

### 7.3 基準

海洋資源開発や海洋再生エネルギー開発に用いられる機器類や浮体・設備等は全て国際法規、国際基準などを満たす必要がある。

国際法規としては国連海洋法条約があり、また国際機関として IMO が関連する法規を定めている。

また、国際基準は ISO および国際電気標準会議 (IEC: International Electrotechnical Commission) 等がある。

#### 7.3.1 IMO

IMO で定める主な法規としては

- ・ 海上人命安全条約 (SOLAS 条約)
- ・ 満載喫水線条約 (LL 条約)
- ・ 海洋汚染防止法条約 (MARPOL 条約)

などがある。

また、移動式掘削浮体については「移動式海洋掘削装置に関する構造設備規則 (MODU (Mobile Offshore Drilling Units) code)」があり、LNG を運搬する船舶・浮体に関しては「液化ガスばら積み輸送のための船舶の構造及び設備に関する国際規則 (IGC (International Gas Carrier) code)」等、種々の規則やガイドラインなどの文書を発効している。

#### 7.3.2 ISO, API

ISO は 165 カ国が加盟する世界最大の任意国際基準規格を策定している機関であり、ほとんどの産業に関する工業規格を出版している。

また、API は 1920 年代から石油・ガス関連の基準を策定している。現在、API 規格と ISO 規格との統一化を図っているが、未だ作業中であるため、浮体等の設計に当たっては、両規格を確認する必要がある。

図 7.3.1 は ISO 規格のうち石油・ガス開発に関連するものの一覧である。



(出典：IOGP)

### 7.3.3 IEC

IECは電気・電子に関連した規格を策定する機関であり、一部技術についてはISOと共同で策定している。例えば、洋上風力発電に関する基準・規則を例にとると、支持構造物関連についてはISO規格、発電施設関連についてはIEC規格と大別することができる。

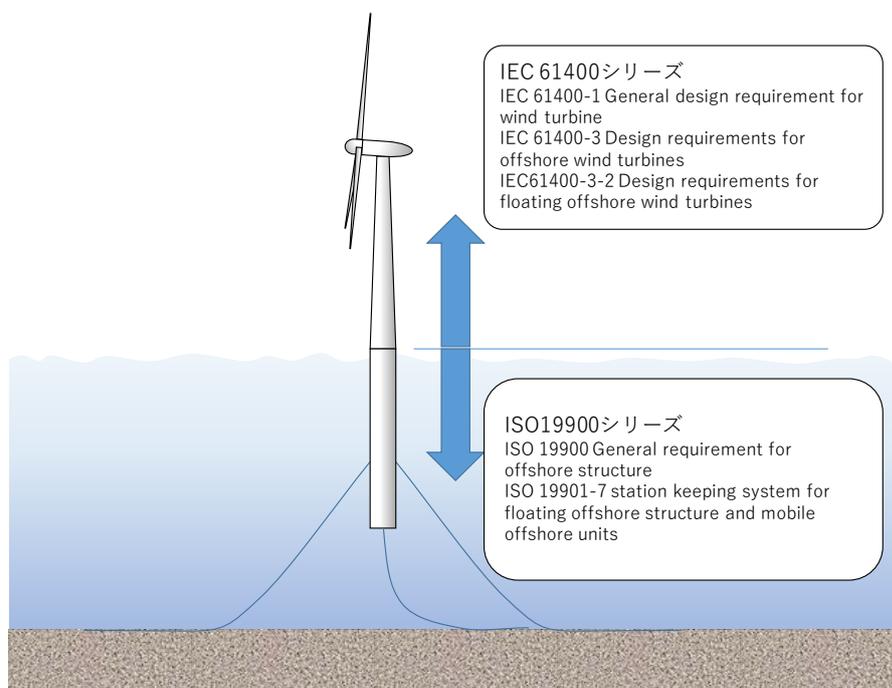


図 7.3.2 洋上風力発電に関する規則の一例

### 7.3.4 その他

上述のIMOやISO、APIおよびIECの他、

- ・ 米国機械学会 (ASME : The American Society of Mechanical Engineers)
- ・ 米国電子電気学会 (IEEE : The Institute of Electrical and Electronics Engineers)
- ・ 米国防食工学会 (NACE : National Association of Corrosion Engineers)
- ・ 石油会社国際海事評議会 (OCIMF : (Oil Companies International Marine Forum)
- ・ 国際ガスタンカー運航者及び基地運用者協会 (SIGTTO : Society of International Gas Tanker and Terminal Operators)
- ・ 船級協会 (classification society)

等で策定しているガイドラインや規格なども設計において考慮する必要がある。

また、各石油開発会社も自社のガイドラインや規格などを揃えている。この石油開発会社毎のガイドラインや規格などは前述のISOやAPIなどに準拠しているものの、安全面などでより厳しい数値を定めている場合がある。特に近年ではHSE (Health, Safety and Environment)が重要視されているため、これに応じたガイドラインなどが策定されている。

## 第7章 海洋構造物の設計

これらの基準・規格・ガイドラインなど、関連する「全て」を満たしていることが必要であり、また満たしていることを証明する必要がある。

### 7.4 認証ステップ

#### 7.4.1 第三者認証機関

図 7.2.1 に示した概念設計、予備設計、基本設計の各設計段階において、必要な基準・規格を満足していることを確認する必要がある。これらの確認は、第三者が認証する必要がある。このような機関を第三者認証機関と称するが、海洋開発の場合の多くは船級協会が第三者として認証している。

船級協会とは海上保険や船舶の売買などのため、船舶に船級を付け、格付けを行う団体であり、世界の主要海運国にはそれぞれの船級協会がある。また、各船級協会は独自の規程を持っており、船舶の他、海洋構造物や潜水艦なども含まれる。

また、主要船級協会によって国際船級協会（IACS：International Association of Classification Society）が組織されており、加盟協会は以下の通りである。

表 7.4.1 IACS 加盟船級協会

国	名称	略称
イギリス	Lloyd's Register of Shipping	LR
フランス	Bureau Veritas	BV
イタリア	Registro Italiano Navale	RINA
アメリカ	American Bureau of Shipping	ABS
ノルウェー (ドイツ)	Det Norske Veritas, Germanischer Lloyd	DNV GL
日本	日本海事協会 (Nippon Kaiji Kyokai)	NK
ロシア	Russian Maritime Register of Shipping	RS
ポーランド	Polish Register of Shipping	PRS
クロアチア	Croatian Register of Shipping	CRC
中国	中国船級協会 (China Classification Society)	CCS
韓国	韓国船級協会 (Korean Register of Shipping)	KR
インド	Indian Register of Shipping	IRS

基本的にはいずれの認証機関を用いて第三者認証を行っても良いが、どの認証機関を選択するかは設計者（社）ではなく、鉱区開発者（社）が最終決定する。

#### 7.4.2 認証プロセス

設計段階に合わせた認証が第三者認証機関によって行われる。

## 第7章 海洋構造物の設計

ここでは米国船級協会 ABS (American Bureau of Shipping) の認証プロセスを例とし、図 7.4.1 に示す。図中、左段は設計の各段階を示しており、先に示した設計フローを参照してもらいたい。中段が認証プロセスであり、右段が各認証プロセスで用いられるリスク評価手法である。

建造プロセスに入るためには「Class Approval」を船級から取得する必要がある。これが、設計段階における基本とも言うべき Approval である。また、船級規則以外の Approval に関しては、それぞれの規則及びガイドラインに基づいて、要求を満足するように設計し、必要な認証を趣致置くしなければならない。そこまでに、どのような認証プロセス・リスク評価などを行っていくか、という道筋を立てる必要がある。

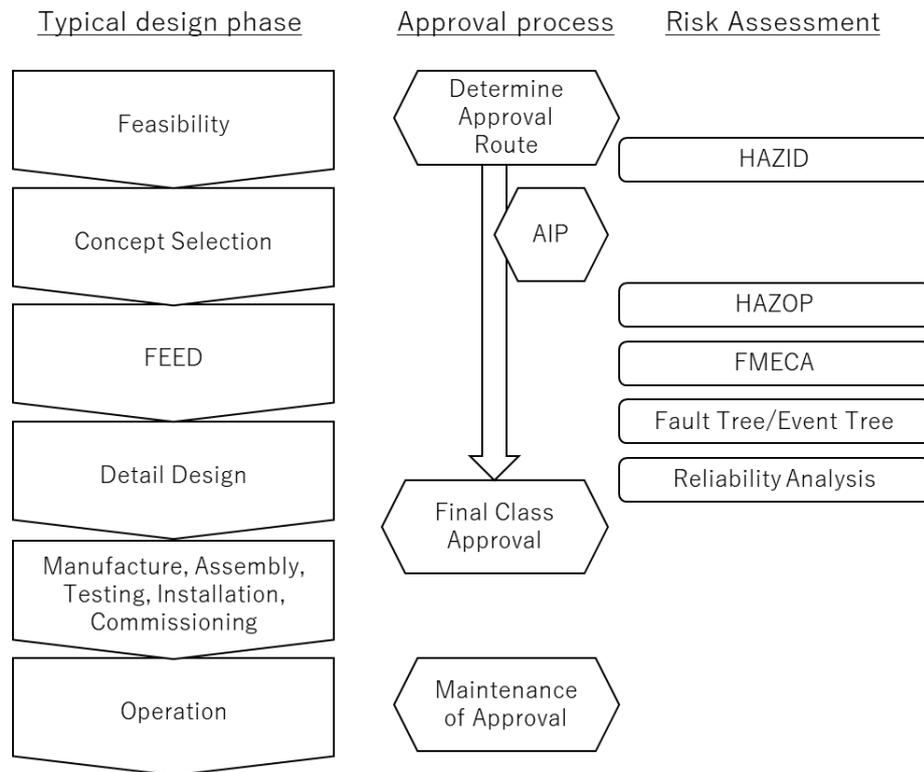


図 7.4.1 認証プロセス

(出典：ABS (2017) )

また、AIP (Approval In Principle) はコンセプト段階での認証であるものの、その概略が技術的に可能であることの裏付けとなるものであり、プロジェクトを進めるかどうかの判断材料にもなる。そのため、技術的にはこれら 2 つの認証を取ることが重要なタスクである。

これらの認証は前述した基準・規則、すなわち IMO や ISO 等が定める各種基準を満足していることが前提である。設計検討が進むにつれて、より詳細に基準・規則を満足しているかどうかを確認する必要がある。

さらに、これらの認証において「どのような事故が発生しうるか、また、その対応策はどのようにするか」のリスク評価が重要となる。設計段階毎に、設計の詳細度が異なるため、

## 第7章 海洋構造物の設計

概念設計段階では明らかにされないリスクであっても、基本設計段階では重大なリスクとなり得る可能性もある。そのため、設計段階毎の認証プロセスとなっている。

### 7.5 リスク評価

海洋構造物の安全性評価手法としてリスク評価に基づく手法がある。これは、Piper Alpha の爆発炎上事故（図 7.5.1 参照）を受けて、1992 年に英国で制定された「Offshore Installations (Safety Case) Regulations」（Safety Case 法）がその代表的なものである。Safety Case 法は英国領海・大陸棚に設置される海洋構造物の重大事故や災害などのリスクを低減させることを目的として制定されており、「客観的な安全性評価」や「自律的な安全管理体制」を求めるものである。オペレータはこの Safety Case 法に基づき、労働者に対するリスクコントロール、重大事故につながるリスクのコントロール、リスクを最小化できる管理システムの構築を文書として作成・提出が義務づけられている。英国にならい、他国においても Safety Case の提出が要求されている場合がある。

本節では、Safety Case に必要なリスク評価手法について概説する。なお、リスク評価手法については「海洋開発産業概論」においても記載されている。



図 7.5.1 Piper Alpha 爆発事故

(出典：Socialist Party Scotland)

Piper Alpha の事故についても「海洋開発産業概論」に詳しいが、簡単な概略を以下に記す。

1988年7月6日、Piper Alpha 上において大量のガスリークが発生・引火し、図 7.5.1 のように完全に炎に包まれた。そのため、浮体上にいた 299 名中 167 名および救助隊員 2 名が死亡する大惨事となった。事故経緯を辿ると、計画点検に備えてコンデンセート (condensate) 輸送用ポンプの 1 基の安全弁を取り外し、仮蓋を取り付けて使用不可としていたが、勤務交代に際して情報伝達の不備があり、誤って使用不可のポンプを起動させたために、可燃性ガスが噴

## 第7章 海洋構造物の設計

出したことが主たる原因である。また、備えられている消火設備を作動させることができず、さらに防火壁も爆発に耐えられずに、火災が大規模となった。

### 7.5.1 リスク評価の流れ

リスク評価手法については、各分野において様々な取り組みがなされているが、ここではIMOにおいて開発された総合的安全評価法（FSA：Formal Safety Assessment）についてまとめる。FSAは規則作成用ツールであり、リスク評価手法を応用してつくられたものである。図7.5.2にFSAの流れを示す。

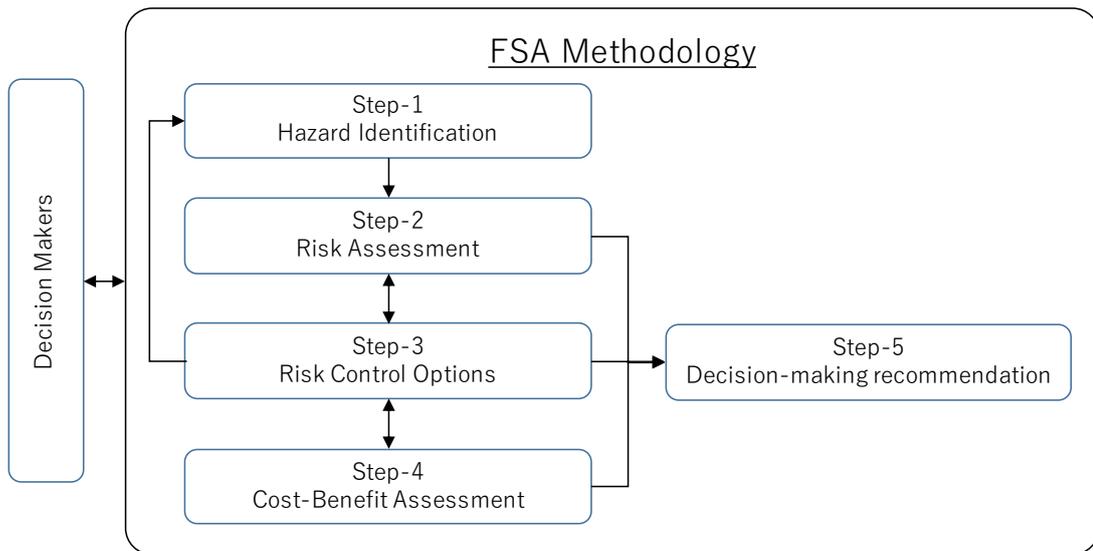


図 7.5.2 FSA の評価段階

（出典：IMO（2015）より著者作成）

図のとおり、FSAは以下の5つのステップで構成されている。

#### Step-1：ハザードの同定

ハザード同定はHAZID（Hazard Identification）と呼ばれるものであり、開発システムにどのような故障が発生するかの洗い出しを行う段階である。

#### Step-2：リスク評価

各故障がどのような事態を引き起こすのか、またその発生頻度や開発システムへ及ぼす影響について評価を行う。

#### Step-3：リスク制御方法（RCO：Risk Control Option）の検討

各故障が引き起こすリスクの回避策もしくは低減策を検討する。発生頻度が高い故障については、発生頻度を下げる方法を検討する、システムへ与える影響が大きい故障については、その故障が発生しても、システムが健全であるようにする、といった具合である。

## 第7章 海洋構造物の設計

### Step-4：リスク制御方法の費用対効果の評価（cost-benefit assessment）

リスクの制御方法に対して、その費用と効果を評価する段階である。例えば、システム全体へ与える影響が小さい故障の場合、その故障リスクを下げるための費用をかけても効果があまり得られない場合がある。一方で、システムへの影響が大きいものについては、費用をかけてでも故障を発生させない、もしくはシステムへの影響を小さくさせる必要がある。

Step-1～Step-3 までは技術面での検討であるが、この Step-4 では経済面を考慮する段階である。Step-4 で費用対効果の小さい RCO と評価された場合の場合は、Step-3 に戻り、再度 RCO を検討する。

### Step-5：最終勧告（decision-making recommendation）

これまでの検討結果を踏まえて、最終的にどのような設計案の修正が望ましいかの勧告を行う。

以下、Step-1 の HAZID と Step-2 のリスク評価の方法について以下に記載するが、「産業概論」にも詳しく記載されているので、そちらも参照されたい。

#### 7.5.2 HAZID

ハザード同定：HAZID は専門家間の討議によってリスクの洗い出しを進めてゆく手法である。HAZID は開発システムにおいて想定しうるハザードを同定することをと呼ぶ。このうちシステムの運用上に起こりうる事象に特化したものを HAZOP (Hazard & Operability study) と呼ぶ。ここでの専門家とは、設計者である浮体構造の専門家だけではなく、電気や化学の専門家といった設計したシステムに必要な全ての専門家、および使用者や第三者機関など関係者全てである。

この専門家の討議を「HAZID 会議」と称する場合が一般的である。この会議の進め方としては FMEA(Failure Mode and Effect Analysis) / FMECA(Failure Mode, Effects and Criticality Analysis)や SWIFT (Structure What-IF Technique) と呼ばれる手法を用いることが一般的である。

FMEA や FMECA は開発システムを構成する機器に着目し、その機器が発生しうる故障を特定し、その故障がシステムに対してどのような影響を及ぼすか、について検討を行うものである。一方、SWIFT は「what-if」とあるとおり「もし～だったら・・・」という問いかけに対して、どのような故障モード（事故）が発生するか、それに対する対応策をどのようにとるかの検討を行う手法である。

この 2 つの手法の違いは上述の対象物の他、着目点を誰が決めるかが異なる。FMEA や FMECA の場合は、多くの場合、機器の設計者（担当者）が着目点（対象）や機能について提示し、提示された対象・機能について故障モードや影響などを会議参加者が討議する方法をとる。一方、SWIFT の場合は会議参加者が着目点などを提示することから始まるため、より自由度の高い着目点の設定がなされることとなる。

## 第7章 海洋構造物の設計

### 7.5.3 リスク評価

HAZID 会議において抽出された故障モードのリスクを評価する。リスクの大きさによって RCO の方針が変わるため、このリスクの大きさを表す指標 (RI : Risk Index) により整理する。この RI の算出にはリスクマトリックスと呼ばれる表を用いる。その一例を表 7.5.1 に示す。RI は頻度による指標 (FI : Frequency Index) と深刻度による指標 (SI : Severity Index) の大きさにより設定されている。発生頻度が高く、被害の深刻度が大きいものは RI が大きく、頻度が少なく、かつ深刻度が小さいものは RI が小さくなる。

HAZID 会議は、これら一連のどのような故障が発生するか、その原因および発生頻度、故障により引き起こされる結果とその深刻度、対処方針と考慮すべき規則などをワークシートにまとめながら進めてゆく。表 7.5.2 にそのワークシートの一例を示す。

表 7.5.1 リスクマトリックス例

		Severity(SI)			
		1	2	3	4
FI	Frequency	minor	Significant	Severe	Catastrophic
7	Frequent	8	9	10	11
6		7	8	9	10
5	Reasonably probable	6	7	8	9
4		5	6	7	8
3	Remote	4	5	6	7
2		3	4	5	6
1	Extremely remote	2	3	4	5

(出典 : IMO (2015) . 色分けは著者)

表 7.5.2 HAZID Worksheet

ID	Hazard Description / Hazardous Situation	Phase Cause	Effect	Detection	Scenario / Accident Sub-category	Regulation	FI	SI	Remarks (including Frequency of Hazards)
1.1	Cargo Hold								
1.1.1	Corrosion								
1.1.1.1	Rapid corrosion of hold frame	All 1) Incorrect selection of coating specification 2) Poor painting workmanship 3) Paint damage by cargo 3) Paint damage by inadequate discharge manner of bulldozer etc. (to be continued)	1) Thickness diminution of structural members including welding parts 2) Crack initiation or Penetration 3) Frame separation in part from shell plate	Visual inspection by crew and surveyors	Structural failure of side shell structure in way of cargo hold	SOLAS XI A.744(18) IACS UR S12 and Z10.2 (introduced into Class Rules) Class Rules	XX	YY	ESP and IACS URs are effective (Reasonably probable)

(出典 : 日本造船研究協会 (2004) )

## 第7章 海洋構造物の設計

### 7.5.4 リスク解析

前述の RI はどの故障モードを優先的に扱うか、の順位付けをするためのものであるが、より具体的にリスクを評価する必要がある。すなわち、HAZID により洗い出された故障モードに起因する事故により災害が発生し最終的にどのような形になるか、についての各状況における発生確率を算出する必要がある。また、災害による結果についても数値的に示す必要がある。

一方、これらを数値的に示すためには、どのような連鎖によって最終的な形となるかを洗い出す必要がある。この洗い出しの方法としてフォールトツリー解析 (FTA : Fault Tree Analysis) やイベントツリー解析 (ETA : Event Tree Analysis) があり、これらを複合させた確率論的リスク評価 (PRA : Probabilistic Risk Assessment) がある。先の FSA はこの PRA に基づいた手法である。

#### (1) FTA

FTA (フォールトツリー解析) は「故障の木解析」とも呼ばれる解析手法であり、ある機器の故障およびその機器の故障によって生じる他の事故・災害の原因を分析するものである。言い換えると「故障から、その原因に遡る」ための解析手法である。

FTA の一例として DPS による位置保持ができない、という故障モードについて考えることとし、図 7.5.3 に例を示す。なお、本例は FTA の考え方を示すものであり、これが全てではないことを断っておく。

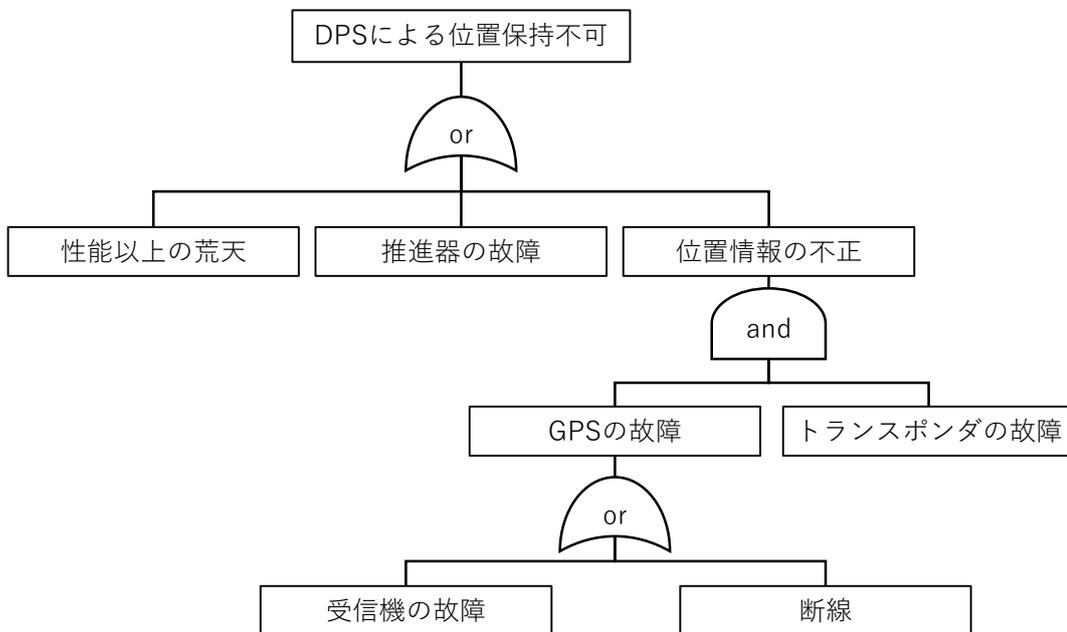


図 7.5.3 FTA の例 (DPS による位置保持不可の場合)

図 7.5.3 の最上位には「故障モード」を示しており、その下の「or」はいずれかの原因で故障が生じることを意味している。この例の場合は、DPS の性能以上の荒天となった (性

## 第7章 海洋構造物の設計

能以上の荒天)、推進器が故障した(推進器の故障)、位置保持すべき位置(座標)が分からなくなった(位置情報の不正)、の3つを位置保持不可の原因としている。

さらに位置情報の不正の原因として、GPSによる信号トラブル(GPSの故障)とトランスポンダからの信号トラブル(トランスポンダの故障)を挙げている。ここでは「and」としているため、GPSおよびトランスポンダ両方とも信号トラブルが発生した場合に位置情報が不正になる、というシナリオである。

さらに、GPSの故障原因としてGPSアンテナの故障(受信機の故障)および信号線の異常(断線)をその原因として挙げており、「or」で結ばれていることから受信機の故障か断線のいずれかが生じれば、GPSが故障する、を意味している。

このように、「故障モード」の原因を探る手法がFTAである。

### (2) ETA

ETA(イベントツリー解析)は「事象の木解析」とも呼ばれ、FTAとは逆に「故障モード」が発生した後にどのような影響を及ぼす可能性があるか、の解析を行う手法である(「風が吹けば桶屋が儲かる」を解析的に行うものである)。上記と同様に、DPSによる位置保持ができなくなった場合を考える。DPS船は掘削船と仮定した時の簡単な例を図7.5.4に示す。

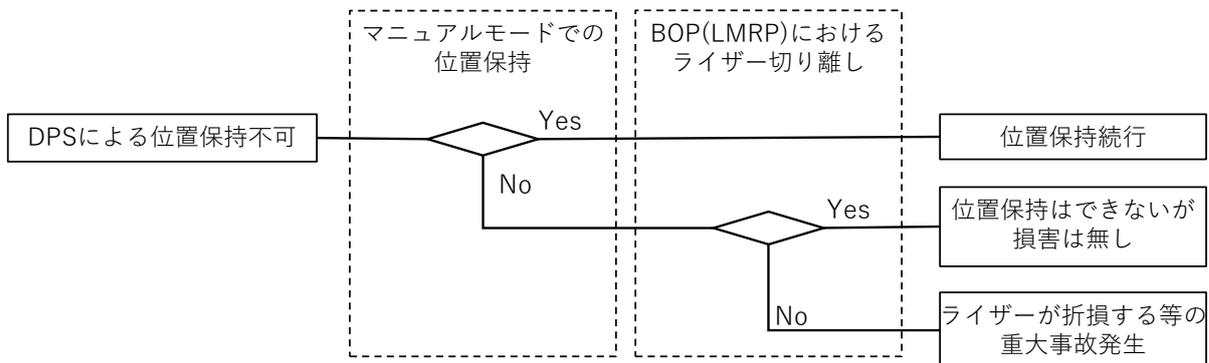


図 7.5.4 ETA の例 (DPS による位置保持不可の場合)

図の左側は故障モードであり、次の点線で囲っている「マニュアルモードでの位置保持」および「BOP (LMRP (Lower Marine Riser Package) ) におけるライザー切り離し」は故障モードに対する対処策であり、右側は最終的な事象を示している。

この例ではDPSにより位置保持ができなくなり、浮体が漂流する可能性がある状況を想定している故障モードである。最初の対応策はDPSではなく、手動に切り替え位置保持を続行するものである。図5.3.6で示したとおり、浮体(掘削船)はある領域に留まっていれば良く、手動での位置保持が可能であれば、その間に故障の復旧を目指すことができる。手動での位置保持が困難な場合には、図2.1.4に示したBOPの上段であるLMRPでライザーを切り離す対応が考えられる。この切り離しは通常でも行われているオペレーションであるため、特に損害は出ない。ただし、浮体が漂流していることには変化がないため、

## 第7章 海洋構造物の設計

この漂流を止めるオペレーションは必要である。LMRPでの切り離しができない場合、浮体は海底面とライザー管で繋がれたまま漂流し、ライザー管が破損・破断するなどの事故につながると考えられる。

このように、発生した故障モードがその後、どのような事象（イベント）を生じさせるかを追求することがETAである。

### (3) リスクの定量化

FTAおよびETAにはそれぞれ分岐がある。ここに発生確率を加えてゆくと、故障モードの発生確率および故障モードが引き起こす最終的なイベントに達する確率を求めることができる。

## 7.6 まとめ

本章では設計の流れおよび各種基準・規格を満足していることを示す認証を得るための手順等について概略を示した。

実際の検討では非常に広範囲の基準・規格の内容を確認する必要があり、また様々な状況を踏まえた検討を通して設計が行われている。

本書第3章で示した自然環境条件は、全ての浮体の設計基準となり得るものであり、環境条件を正しく把握することが、まず重要である。この環境条件を踏まえて4章で示した海洋構造物そのものの挙動や構造応答などを把握し、耐用年数のあいだ、浮体が壊れることなく稼働できるような設計とする必要がある。応力が集中し、破損の可能性があるような構造については、材料や構造の見直しなどを行う必要がある。さらに浮体の場合では、ある位置に浮体を留めておく必要があることから、5章で示した位置保持技術を用いる。

一方、水面下のシステムについては6章で示したようなライザーシステムやサブシーシステムがあり、それらが直面する問題として重要視されているフローアシュアランスについても説明している。これらの問題も設計段階においてどのようにメンテナンスを行うのか、特に人の手が全く届かない大水深域における作業を念頭においた設計が必要となる。

第7章で紹介したリスク評価や各種基準については上記のような予備知識が必要不可欠である。

## 第7章 海洋構造物の設計

### <参考資料>

- International Association of Oil and Gas Produces (IOGP). ISO Standards for use in the oil & gas industry, (cited 2020-12-31)
- American Bureau of Shipping (ABS). Guidance Notes on Review and Approval of Naval Concepts, 2017
- IMO. Revised Guidelines for Formal Safety Assessment (FSA) for use in the IMO rule-making process. 2015. <http://research.dnv.com/skj/IMO/MSC-MEPC.2-Circ.12-Rev.1.pdf> (cited 2020-12-31)
- HSE. “Safety Case”. Gov. of United Kingdom. <https://www.hse.gov.uk/offshore/safetycases.htm>. (cited 2020-12-31)
- Socialist Party Scotland. “Piper Alpha: The price of profit”. <https://socialistpartyscotland.org.uk/2013/06/27/piper-alpha-the-price-of-profit/> (cited 2020-12-31)
- 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. 海洋開発産業概論 改訂第1版. 国土交通省, 2017, 284 p.
- 日本船舶海洋工学会. 大規模海上浮体施設の構造信頼性および設計基準研究委員会報告書
- 日本造船研究協会. バルクキャリアの安全性に関する調査研究 成果報告書 (RR-S702) . 2004
- 日本船舶輸出組合 ; ジャパン・シップ・センター ; 日本船舶技術研究協会. オフショア浮体式構造物に係る各種基準・規則などの概説. 2015.
- 後藤伸寿 ; 重盛正哉. フォールトツリー解析及びイベントツリー解析によるリスク評価の事例. みずほ情報総研技報. 2015, Vol.7, No.1, p.33-40.
- 米沢哲夫. HSE マネジメントシステムの現状と動向. 石油・天然ガスレビュー. 2011, Vol.45, No.2, p.41-55.
- International Maritime Organization (IMO). REVISED GUIDELINES FOR FORMAL SAFETY ASSESSMENT (FSA) FOR USE IN THE IMO RULE-MAKING PROCESS. 2015
- American Bureau of Shipping (ABS). Review and Approval of Novel Concepts. 2017.
- 金湖富士夫 ; 有馬俊郎. 船舶海洋分野におけるリスク評価の事例としての FSA. 海上技術安全研究所報告. 2009, 第8巻, 第4号, p.19-58.
- IACS. “IACS Members”. IACS. <http://www.iacs.org.uk/about/members/> (cited 2020-12-31)

(付録)海洋開発 参考動画集

(付録) 海洋開発 参考動画集

- Offshore Learning Center  
<http://www.offshore-mag.com/learning-center.html>
- 日本海洋掘削株式会社 会社紹介ビデオ  
<https://www.youtube.com/watch?v=l-N8WDyodj4>
- 深海科学掘削技術～地球深部探査船「ちきゅう」～  
<https://www.youtube.com/watch?v=1n-wLHvcKi0&t=154s>
- 海底広域研究船「かいめい」機能紹介  
<https://www.youtube.com/watch?v=iQKYwey4d3c&t=70s>
- 海洋資源調査船「白嶺」紹介映像  
<https://www.youtube.com/watch?v=idawAZZmVpE>
- 物理探査船「資源」紹介映像  
<https://www.youtube.com/watch?v=IHTQfSSuiAk>
- 三井海洋開発株式会社 事業紹介映像  
<https://www.youtube.com/watch?v=CfGSyP4ivT8>
- イクシスプロジェクト 関連動画  
<http://www.inpex.co.jp/ichthys/movie.html>

## 索引

## 【和英 五十音順】

アイスガウジング (ice gouging) .....	63, 66
アスファルテン (asphaltene) .....	9, 153
アンビリカル (umbilical).....	8, 129, 158
イベントツリー解析 (Event Tree Analysis,ETA) .....	175, 176
渦励振 (Vortex Induced Vibration,VIV) .....	134
うねり (swell) .....	32, 35, 40
遠隔操作無人潜水機 (Remotely Operated Vehicle,ROV) .....	3, 128
応答関数 (response function) .....	81, 84, 90, 94
海流 (ocean current).....	32, 56, 57, 63, 70, 101
規則波 (regular wave) .....	32, 37, 80, 81, 83, 90
基本設計 (Front End Engineering and Design,FEED).....	21, 165
構造設備規則 (MODU (Mobile Offshore Drilling Units) code) .....	166
国際海事機関 (International Maritime Organization,IMO) .....	125
国際標準化機構 (International Organization for Standard,ISO) .....	98
固有周期 (natural period) .....	81, 87, 89, 90, 93
固有周波数 (natural frequency) .....	84, 93
コリオリ力 (Coriolis force) .....	49
混相流 (multiphase flow) .....	140, 141, 155
再現期間 (return period) .....	74, 98, 101
サブシー生産システム (Subsea Production System,SPS).....	7, 128, 139
自動船位保持装置 (Dynamic Positioning System,DPS) .....	7
周波数応答関数 (frequency response function) .....	80, 84, 109
自律型無人潜水機 (Autonomous Underwater Vehicle,AUV) .....	3, 128
浸食 (erosion) .....	140, 155, 156
推力配分 (control allocation).....	120
スチールカテナリーライザー (Steel Catenary Riser,SCR) .....	132, 136
スペクトル (spectrum) .....	41, 46, 53, 81, 85, 92
生産システム (production system).....	2, 7, 134
セミサブ型浮体 (semi-submergible type floating unit) .....	94
船級協会 (classification society) .....	98, 169
総合的安全評価法 (Formal Safety Assessment,FSA).....	172
層流 (laminar flow) .....	140, 147
潮流 (tidal current) .....	21, 32, 56, 59, 70
津波 (tsunami).....	32, 35

## 索引

電気標準会議 (International Electrotechnical Commission,IEC) .....	166
テンションレッグプラットフォーム (Tension Leg Platform,TLP) .....	116
度数分布表 (scatter diagram) .....	44, 101
突風率 (gust factor) .....	52
ドライブオフ (drive off) .....	124
ドリフトオフ (drift off) .....	124
ハザード同定 (Hazard Identification,HAZID) .....	172
漂流力 (drifting force) .....	90
風波 (wind wave).....	32, 34
フォールトツリー解析 (Fault Tree Analysis,FTA).....	175
不規則波 (irregular wave).....	32, 37, 41
復原力 (restoring force).....	79, 87, 90, 115
腐食 (corrosion) .....	139, 140, 153
浮体式海洋石油・ガス生産貯蔵積出設備 (Floating Production, Storage and Offloading unit,FPSO) .....	7
フローアシュアランス (flow assurance) .....	9, 139, 149
フローライン (flowline).....	8, 128, 134, 138
分散関係 (dispersion relation) .....	33
噴出防止装置 (Blowout Preventer,BOP) .....	6
米国石油協会 (American Petroleum Institute,API).....	98
方向分布関数 (directional spreading function) .....	43
包接水和物 (clathrate hydrate).....	148
無人潜水機 (Unmanned Underwater Vehicle,UUV) .....	156
有義値 (significant value) .....	99
ライザー (riser) .....	3, 6, 7, 128, 132, 176
乱流 (turbulent flow).....	52, 140, 147
リスク評価 (risk assessment) .....	66, 165, 169, 171
レイノルズ数 (Reynolds number,Re).....	140
レイリー分布 (Rayleigh distribution).....	39
6(ろく)自由度 (6(six) Degree Of Freedom,6DOF) .....	79, 96
ワックス (wax) .....	9, 139, 151

## 索引

### 【英和 アルファベット順】

American Petroleum Institute (API, 米国石油協会).....	98
asphaltene (アスファルテン).....	140
Autonomous Underwater Vehicle (AUV, 自律型無人潜水機).....	3, 128
Blowout Preventer (BOP, 噴出防止装置).....	6
classification society (船級協会).....	98, 168
clathrate hydrate (包接水和物).....	148
control allocation (推力配分).....	120
Coriolis force (コリオリ力).....	49
corrosion (腐食).....	139
directional spreading function (方向分布関数).....	43
dispersion relation (分散関係).....	33
drift off (ドリフトオフ).....	124
drifting force (漂流力).....	90
drive off (ドライブオフ).....	124
Dynamic Positioning System (DPS, 自動船位保持装置).....	7, 115
erosion (浸食).....	140
Event Tree Analysis (ETA, イベントツリー解析).....	175
Fault Tree Analysis (FTA, フォールトツリー解析).....	175
Floating Production, Storage and Offloading unit (FPSO, 浮体式海洋石油・ガス生産貯蔵積出設備).....	7
flow assurance (フローアシュアランス).....	9, 139
flowline (フローライン).....	8, 128
Formal Safety Assessment (FSA, 総合的安全評価法).....	172
frequency response function (周波数応答関数).....	80
Front End Engineering and Design (FEED, 基本設計).....	21, 165
gust factor (突風率).....	52
Hazard Identification (HAZID, ハザード同定).....	172
ice gouging (アイスガウジング).....	63
International Electrotechnical Commission (IEC, 電気標準会議).....	166
International Maritime Organization (IMO, 国際海事機関).....	125
International Organization for Standard (ISO, 国際標準化機構).....	98
irregular wave (不規則波).....	32
laminar flow (層流).....	140
MODU (Mobile Offshore Drilling Units) code (構造設備規則).....	166
multiphase flow (混相流).....	140
natural frequency (固有周波数).....	84
natural period (固有周期).....	32
ocean current (海流).....	32

## 索引

production system (生産システム).....	2
Rayleigh distribution (レイリー分布).....	39
regular wave (規則波).....	32
Remotely Operated Vehicle (ROV,遠隔操作無人潜水機).....	3, 128
response function (応答関数).....	81
restoring force (復原力).....	79
return period (再現期間).....	74
Reynolds number (Re, Reynolds 数).....	140
riser (ライザー).....	3, 128
risk assessment (リスク評価).....	66
scatter diagram (度数分布表).....	44
semi-submergible type floating unit (セミサブ型浮体).....	94
significant value (有義値).....	99
6(six) Degree Of Freedom (6DOF,6 自由度).....	79
spectrum (スペクトル).....	41
Steel Catenary Riser (SCR,スチールカテナリーライザー).....	132
Subsea Production System (SPS,サブシー生産システム).....	7, 128
swell (うねり).....	32
Tension Leg Platform (TLP,テンションレッグプラットフォーム).....	116
tidal current (潮流).....	32
tsunami (津波).....	32
turbulent flow (乱流).....	52, 140
umbilical (アンビリカル).....	8, 128
Unmanned Underwater Vehicle (UUV,無人潜水機).....	156
Vortex Induced Vibration (VIV,渦励振).....	134
wax (ワックス).....	9, 139
wind wave (風波).....	32

## 索引

### 【略語 アルファベット順】

AIP (Approval In Principle) .....	170
API (American Petroleum Institute, 米国石油協会) .....	98, 166
AUV (Autonomous Underwater Vehicle, 自律型無人潜水機) .....	3, 128, 156, 159
BOP (Blowout Preventer, 噴出防止装置) .....	6, 132, 176
DPS (Dynamic Positioning System, 自動船位保持装置) .....	7, 115, 119
EDS (Emergency Disconnect Sequence / System) .....	124
ETA (Event Tree Analysis, イベントツリー解析) .....	175, 176
FEED (Front End Engineering and Design, 基本設計) .....	21, 165
FMECA (Failure Mode, Effects and Criticality Analysis) .....	173
FPSO (Floating Production, Storage and Offloading unit, 浮体式海洋石油・ガス生産貯蔵積出設備) .....	7, 97, 116, 134, 164
FSA (Formal Safety Assessment, 総合的安全評価法) .....	172, 175
FTA (Fault Tree Analysis, フォールトツリー解析) .....	175
HAZID (Hazard Identification, ハザード同定) .....	172, 173
IEC (International Electrotechnical Commission, 電気標準会議) .....	166, 168
IMO (International Maritime Organization, 国際海事機関) .....	125, 166, 172
ISO (International Organization for Standard, 国際標準化機構) .....	98, 132, 166
MPM (Most Provable Maximum) .....	99
QTF (Quadratic Transfer Function) .....	91
Re (Reynolds number, Reynolds 数) .....	140
ROV (Remotely Operated Vehicle, 遠隔操作無人潜水機) .....	3, 128, 156
SCR (Steel Catenary Riser, スチールカテナリーライザー) .....	132, 136
6DOF (6 Degree of freedom, 6 自由度) .....	79
SPS (Subsea Production System, サブシー生産システム) .....	7, 79, 128
SWIFT (Structure What-IF Technique) .....	173
TLP (Tension Leg Platform, テンションレッグプラットフォーム) .....	116, 137
UUV (Unmanned Underwater Vehicle, 無人潜水機) .....	156
VIV (Vortex Induced Vibration, 渦励振) .....	134

【執筆代表】

前田克弥（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  
海洋開発系 上席研究員）

【執筆者】五十音順

荒木元輝、大坪和久、齋藤昌勝、中島康晴、藤原智、正信聡太郎、山本譲司

平成 29 年度 海洋開発人材育成 海洋開発工学概論 海洋開発技術編  
ワーキンググループ委員一覧（順不同）

【座長】

正信聡太郎（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  
海洋開発系長）

【委員】

鈴木英之（東京大学大学院工学系研究科 システム創成学専攻 教授）

佐藤時幸（秋田大学 副学長（国際戦略担当） 国際資源学研究科長 国際資源学部長）

藤久保昌彦（大阪大学大学院工学研究科 地球総合工学専攻 船舶海洋工学部門 教授）

古川芳孝（九州大学大学院工学研究院 海洋システム工学部門 教授）

三輪正弘（国際石油開発帝石株式会社 技術本部 開発技術ユニット ジェネラルマネージャー）

常盤安弘（新日鉄住金エンジニアリング株式会社 海洋事業部 プロジェクト部長）

栗島裕治（ジャパン マリンユナイテッド株式会社 海洋・エンジニアリング事業本部  
海洋エンジニアリングプロジェクト部 部長）

※所属、肩書は 2017 年 12 月時点のもの

平成 29 年度 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一覧（順不同）

【委員長】

鈴木 英之（東京大学大学院工学系研究科 システム創成学専攻 教授）

【委員】

佐藤 時幸（秋田大学 副学長（国際戦略担当） 国際資源学研究科長 国際資源学部長）

藤久保昌彦（大阪大学大学院工学研究科 地球総合工学専攻 船舶海洋工学部門 教授）

古川 芳孝（九州大学大学院工学研究院 海洋システム工学部門 教授）

中島 喜之（株式会社 IHI 社会基盤・海洋事業領域 F-LNG SBU 副 SBU 長）

佐々木 丈一（川崎汽船株式会社 理事 先進技術グループ長）

脇山 典広（川崎重工業株式会社 船舶海洋カンパニー 技術本部 海洋設計部 基幹職）

三輪 正弘（国際石油開発帝石株式会社 技術本部 開発技術ユニット ジェネラルマネージャー）

関本 恒浩（五洋建設株式会社 執行役員 技術研究所担当）

粟島 裕治（ジャパン マリンユナイテッド株式会社 海洋・エンジニアリング事業本部 海洋エンジニアリングプロジェクト部 部長）

川越 美一（株式会社商船三井 常務執行役員）

常盤 安弘（新日鉄住金エンジニアリング株式会社 海洋事業部 プロジェクト部長）

清水 正巳（大成建設株式会社 土木本部土木技術部部長（技術担当）兼 海洋技術室 室長）

河合 展夫（株式会社地球科学総合研究所 代表取締役社長）

苅谷 俊行（千代田化工建設株式会社 執行役員 成長戦略本部 本部長代行）

西川 正夫（東亜建設工業株式会社 土木事業本部 理事）

勝間 寛（東洋エンジニアリング株式会社 資源エネルギー事業本部 事業本部長代行 兼 資源プロジェクト本部長）

岸本 直彦（日揮株式会社 プロジェクトマネジメント本部 プロジェクト部 モジュールグループ グループリーダー）

上田 真司（日本海洋掘削株式会社 人材育成推進室長）

吉田 泰三（日本郵船株式会社 工務グループ グループ長）

坪川 毅彦（三井海洋開発株式会社 常務執行役員）

横田 浩明（三井造船株式会社 企画本部 海洋事業推進部長）

小松 正夫（三菱重工業株式会社 インダストリー&社会基盤ドメイン 船舶・海洋事業部 船舶・海洋技術部 主幹技師）

※所属、肩書は 2017 年 12 月時点のもの

