4 波力発電システム

波力発電は、様々なアイデア創造を含めて、研究開発の途上にある。このため、基本原理は流体力学等に立脚するものの、統一的あるいは慣用的な方法論は確立していない。このため、施工技術や維持管理技術を細かく議論する段階には至っていない。ここでは、基礎原理に軸足をおいた説明になるが、開発の方向性を感じ取ってほしい。

この分野の概略については、「4.1 概説」のみを読んでいただければこと足りる。もう少し解析的に勉強したい読者は、各論に進んでいただきたい。

4.1 概説

4.1.1 技術の歴史

19 世紀の末ごろから波のエネルギーを利用した波力発電装置（WEC：Wave Energy Converter）の開発が進められてきた。例えば図 4.1.1 に示すような波による上下動を油圧ポンプの動力に変換するアイデアが特許として示されている。また、フランスのボルドーでは、図 4.1.2 に示すような振動水柱型波力発電装置の開発が行われた実績がある。

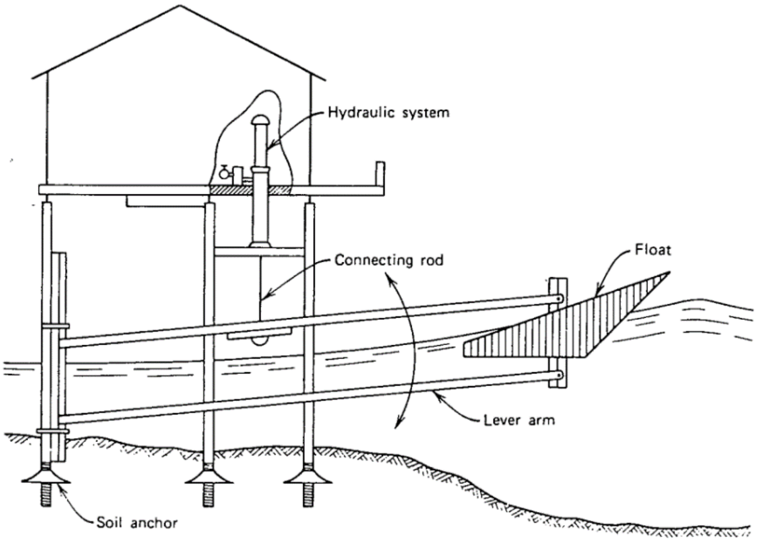


図 4.1.1　波力発電初期のアイデア
（出典：益田善雄、1987）

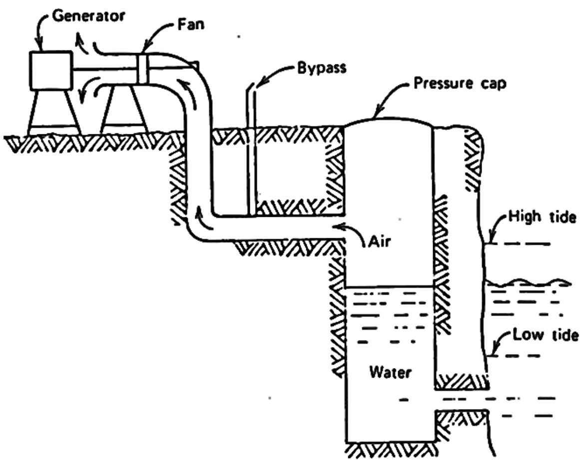


図 4.1.2　Bouchaux-Praceique での振動水柱型波力発電試験
（出典：益田善雄、1987）

我が国においては、益田善雄が 1940 年代頃から波力発電装置の開発に精力的に取り組んだ。海軍所属であった益田は、船のホギング（hogging）、サギング（sagging）の原理を応用し、長浮体の折れ曲がり運動を発電機の回転に伝達する方式（後述の Pelamis の方式）で 1947 年には実海域試験を行っている。

さらに益田は、1957 年に神奈川県小田原市国府津の海岸にて図 4.1.3 に示す前後係留式浮体型波力発電装置の試験を行った。この方式は、フロートの主に前後揺れ（図の左右方向）をワイヤーロープの運動に変換して発電するもので、最終的には 50W の発電に成功している。

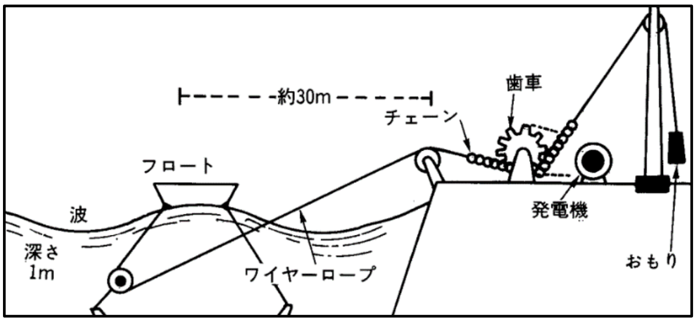


図 4.1.3　前後係留式浮体型波力発電装置
（出典：益田善雄、1987）

その後、波の変位を機械的に発電機構（PTO：Power Take Off）に伝達する方式の困難さもあり、益田は空気タービン式、現状の振動水柱型波力発電方式の検討を精力的に行った。具体的には、図 4.1.4 に示す 4 枚弁式波力発電装置を開発した。波の往復運動により発電装置内部の空気に往復運動が生じるが、4 枚の弁（図中の弁 1～弁 4）をたくみに配置して、これを同一方向の空気の流れに変換し、同一方向にタービンを回転させる機構を考案した。500W の発電機を用い、神奈川県横須賀市の観音崎にて波高 2m の波の中で 400W の発電を記録した。

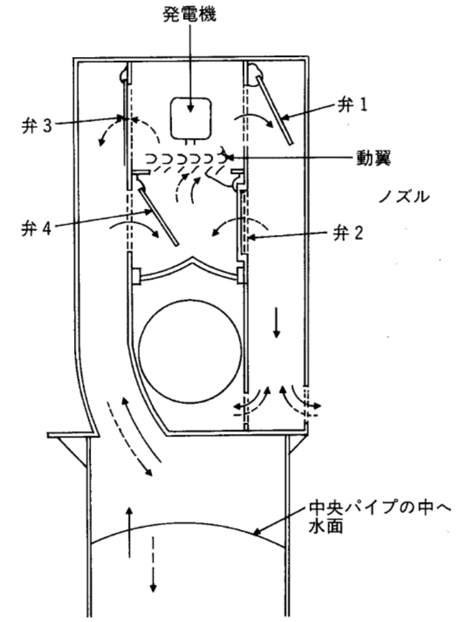


図 4.1.4　４枚弁式波力発電装置
（出典：益田善雄、1987）

本方式は、海上保安庁灯台部でも採用され航路標識ブイ（図 4.1.5）に波力による電力供給が行われた。最終的には1000基以上の航路標識ブイで利用された。参考までに、長さ7.5mの模型による水槽試験から求めたエネルギー吸収効率（energy absorbing efficiency、入射波のエネルギーに対する吸収エネルギーの比）を図 4.1.6に示す。

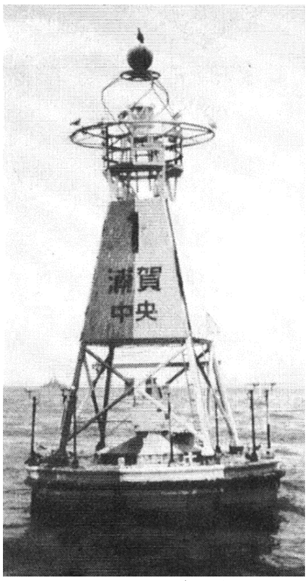


図 4.1.5　益田式航路標識ブイ
（出典：高橋重雄、1993）

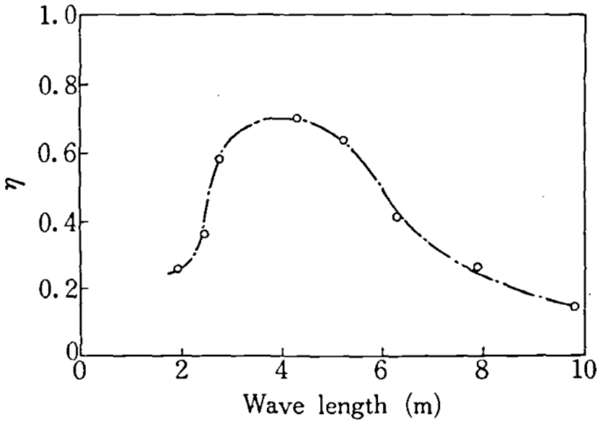


図 4.1.6　益田式波力発電装置のエネルギー吸収効率
（出典：Miyazaki T. et al.、1978）

第一次オイルショック（1973 年）の後、自然エネルギー活用の気運が高まり、世界的にも波力発電装置の検討が各国で行われる状況となった。例えば 1974 年には英国エジンバラ大学の Stephen Salter 教授は、図 4.1.7 に示すような水面付近で波力により動揺する Salter's Duck と呼ばれる波力発電装置を検討した。

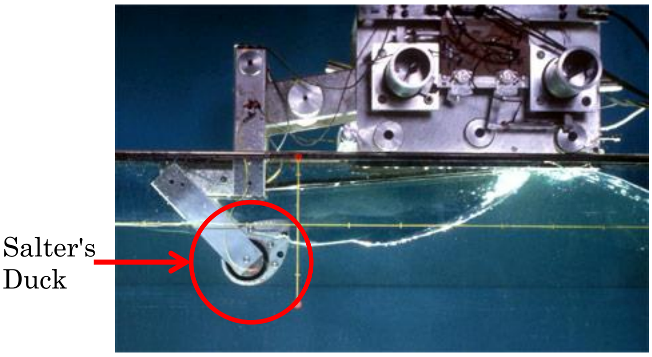


図 4.1.7　Salter's Duck 試験状況
（出典：HOW STUFF WORKS ウェブサイトの図を一部改変）

図 4.1.8 に示すように、Salter's Duck の形状は、波下側（図中、Stern。以下同じ）は回転中心を中心にした円弧であり、波上側（Paunch）は指数関数である。突出部（Beak）に波の山が来れば右回転し、谷が来れば左回転する。この回転運動をエネルギーに変換する。エネルギー吸収効率を図 4.1.9 に示す。理論上は最適点で吸収効率が 100%に達することから吸収効率は非常に優れているといえる。

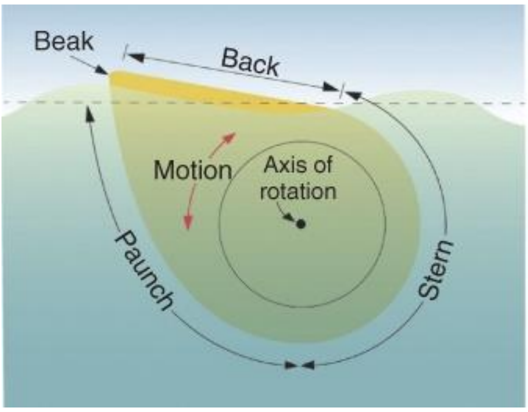


図 4.1.8　Salter's Duck の可動イメージ
（出典：Paul A. Lynn、2014）

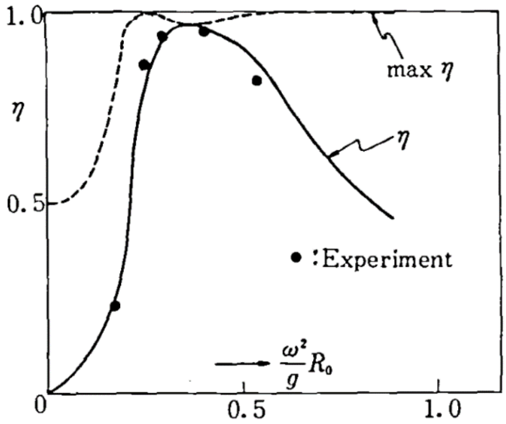


図 4.1.9　Salter's Duck のエネルギー吸収効率
（出典：前田久明、木下健、1979）

図 4.1.9 において、縦軸はエネルギー吸収効率を表し、$\eta = PQ/(0.5\rho g a^2 V_g L)$ で定義されている。ここで、P は発電のための油圧装置の油圧、Q は油圧流量、ρ は流体密度、g は重力加速度、a は入射波振幅、V_g は波の群速度、L は浮体の長さである。横軸は無次元化された波周波数である。また、曲線 η は実験値を滑らかに結んだものであり、maxη は理論的な最大値である。

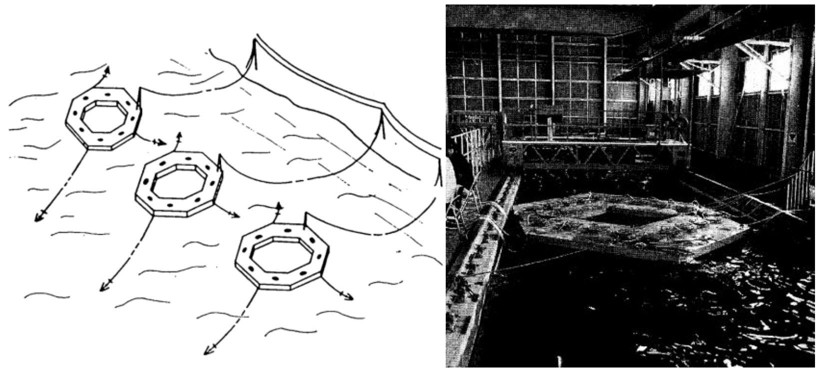


図 4.1.10　大型波力発電リングブイ構想と海洋科学技術センターでの試験の様子
（出典：益田善雄、1987）

我が国においても波力発電に対する関心の高まりから旧防衛省、海洋科学技術センター（現在の国立研究開発法人海洋研究開発機構、JAMSTEC）の試みにより直径 100m、4000kW 発電を空気タービンにより行うリングブイ構想の研究開発が行われた（図 4.1.10）。

その後の発展として、実海域での本格的な波力発電装置の研究開発が海洋科学技術センターにより行われた。具体的には、山形県の酒田港北防波堤や千葉県山武郡九十九里町片貝で定置式波力発電の試験が行われ、山形県鶴岡市由良の沖合では浮体式波力装置「海明」（図 4.1.11）による研究開発が行われた。

図 4.1.11　海明
（出典：海洋科学技術センター（現在の海洋研究開発機構）、1981）

海明は、長さ 80m、幅 12m、高さ 5～7m の浮体であり、海域での支配的な波方向に向けて係留された。1978 年から 125kW の発電機 3 台を搭載して第 1 次の試験が開始され、様々な基礎データが取得された。問題点の一つは波による上下動が大きいため、搭載された発電装置に対する波面の上下運動が相対的に小さくなり、波力効率の低下を招いたことであった。

1979 年からは、国際エネルギー機関（IEA : International Energy Agency）との共同研究事業として第 2 次試験が開始された。このときには 8 台の発電機が搭載された。その内 1 台は、陸上への送電も試みられ、冬場（1 月）には最大 190kW、平均 20kW を記録した。また大波の際には、その内の 1 台で最大 400kW、平均 50kW を記録した。本実海域試験は 2 年間行われた。このときの発電単価は 360 円/kWh と総括された。技術的には、平均的な海象としてのより波長が長い波（波長 120m 程度）に対するエネルギー回収効率（浮体の大型化）、斜め波での発電性能の向上、浮体動揺減少による発電効率の向上が課題として挙げられた。

海明の第 3 次試験は 1985 年から約 1 年間行われた。ただし、オイルショックによる石油価格の高騰は収まり、価格下落に転じていたため、波力発電に対する社会的な機運も弱まっていた状況の中ではあった。係留安全性、タンデムウェルズタービン（tandem Wells turbine）性能、送電ケーブルの耐久性等の課題が検証された。また、波高 2m のときに平均 24kW、5m 波高時に 240kW の発電性能が確認された。

その後、海洋科学技術センターによる新しい波力発電装置（通称マイティーホエール）の実機規模実験装置（プロトタイプモデル：長さ 50m、幅 30m）が 1998 年 5 月に建造され、同年 7 月から 2002 年 3 月まで三重県度会郡南勢町（現、南伊勢町）の五ヶ所湾沖合に係留設置された。本方式の装置の安全性、耐久性および経済性を実証し、実用化のための知見を得るため、約 2 年間にわたる実海域実験が実施された。

図 4.1.12　マイティーホエール
（出典：日本財団図書館ウェブサイト）

マイティーホエール（図 4.1.12）は、大きく分けて装置本体と空気タービン・発電機システムから構成されている。装置本体は、波エネルギーを吸収して空気出力を得る三つの空気室と浮体上部の機械室の中にある各空気室の上に空気タービン・発電機が設置されている。

空気タービン・発電機は、システムとして運用され、波エネルギーから変換された空気エネルギーを電気エネルギーなどに変換するための二次変換装置として使用される。通常、タービン・発電機は、発電可能な海象状態のときに自動的に発電し、波高が低いといった海象状態の場合には、遊転状態（無負荷状態）となる。逆に、荒天になった場合（波高が非常に高く、タービン・発電機が危険回転数に達した場合）には、タービンは、空気入力を安全弁により自動的に遮断し、タービン・発電機は、停止するシステムとなっている。

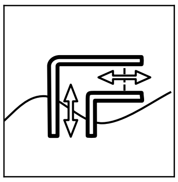
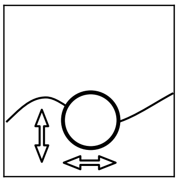
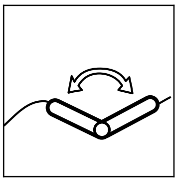
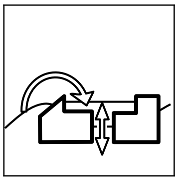
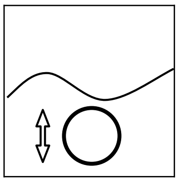
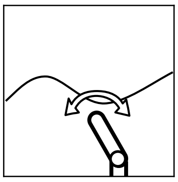
近年においては、再生エネルギー利用の重要性が再認識され、英国スコットランド・オークニーにおいて欧州海洋エネルギーセンター（EMEC：European Marine Energy Centre）により実海域での発電性能試験が活発に行われている。Aquamarine power、Pelamis wave power、Scottish power renewables、Wello といった開発企業が波力発電装置の開発を進めている。

4.1.2　構造形式

波力発電施設の発電構造形式を分類すると一般的に以下のように分類できる。また、それぞれは、主として水面に設置される形式、海底から水中で活用される形式がある。

- 振動水柱型（OWC：Oscillating Water Column）：浮体や構造物に設けた海面を貫通する空気室と空気タービンを利用する方法
- 可動物体型（moving object）：波による浮体の上下運動や受圧板の運動などを利用する方法
  - 並進動揺型（point absorber）：発電機構と連結した可動物が水平・垂直に変位することにより発電する形式
  - 屈曲動揺型（attenuator）：発電機構と連結した可動物が回転角を持つことにより発電する形式
- 越波型（overtopping）：波が堤防など越えていく越波現象により生じる水位差を利用する方法

表 4.1.1　主な波力発電施設の分類

設置場所	振動水柱型 Oscillating water column	可動物体型		越波型 Overtopping device
		並進動揺型 Point absorber	屈曲動揺型 Attenuator	
水面				
水中海底				

（出典：EMEC ウェブサイトの図を参考に作成）

表 4.1.1 に発電構造形式と設置場所をまとめるとともに、各発電システムの概要について以下に述べる。また、比較的開発が進んでいる振動水柱型を 4.2 節で、可動物体型を 4.3 節で詳しく解説する。

(1) 振動水柱型

下面のみを開放した円筒を海面に差し入れると、波が通過するとき空気室内の海面は少し上下するが、特定の周期の波の中では共振を起こして大きく上下する。この現象は水柱振動と呼ばれる。波の通過によって水柱振動が起きている空気室内では内部の圧力は大きく変化し、空気室の上面に穴があれば空気の出入りが生じる。そこに空気タービンを置き発電する方式である。空気タービンには往復気流中でも常に一方向に回転することができ、形状や構造が簡単であるウェルズタービン（Wells turbine）が主に採用されている。基本的には沿岸に設置する固定式と陸から離れたところに設置可能な浮体式に大別できる。

沿岸固定式の代表例として LIMPET を挙げることができる（図 4.1.13）。英国の Wavegen 社がクイーンズ大学の協力を得て開発したもので、スコットランドのアイラ島で 500kW の世界初の産業用発電を行っている。また、オーストラリアの Oceanlinx 社は、沿岸設置型の振動水柱型装置を開発した。350kW 装置の実海域試験がニューサウスウェールズ州のケンブラ港にて行われた（図 4.1.14）。

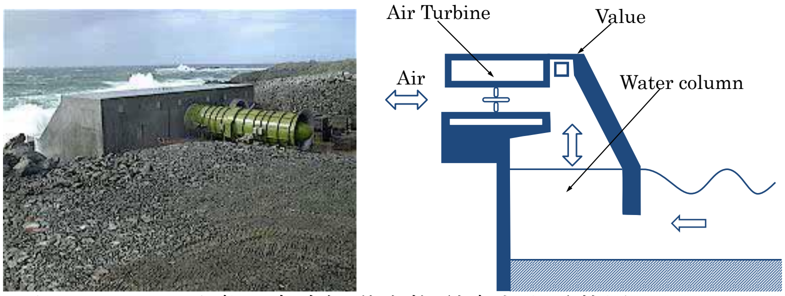


図 4.1.13　沿岸固定式振動水柱型波力発電装置 LIMPET
（出典：Water Pawer & Dam Construction ウェブサイトの図を参考に作成）

図 4.1.14　沿岸設置型振動水柱型波力発電装置 Oceanlinx MK1
（出典：Oceanlinx 社ウェブサイト）

沿岸設置型発電装置は、給電を行う電気設備に対して発電装置が近接できること、アクセスやメンテナンスも含めた運用が容易であることが利点として挙げられる。その一方で、陸地を占有することから設備の設置に対して制約が発生すること、海岸域の環境破壊を少なからず生じさせること、装置に到達するまでに浅瀬域では波のエネルギーが減少されていること等が欠点として挙げられる。

浮体式では、我が国で開発され実海域試験が実施された「海明」と「マイティーホエール」が代表的なものである。これらについては、「4.1.1 技術の歴史」に述べた他、「4.2.1 波エネルギー吸収の基本メカニズム」でも解説している。

近年では、後ろ曲げダクトブイ型（BBDB：Backward Bend Duct Buoy）と呼ばれる形式も開発されている（図 4.1.15）。この方式の詳細についても「4.2.1 波エネルギー吸収の基本メカニズム」で解説している。

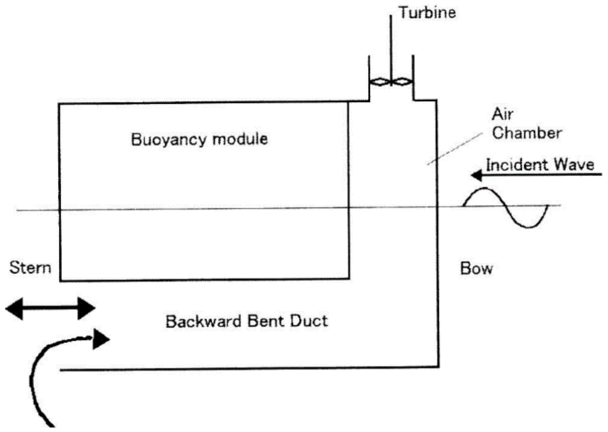


図 4.1.15　浮体式振動水柱型波力発電装置（BBDB）
（出典：今井康貴等、2012）

(2) 並進動揺型

最も実用化に近いものと見られる波力発電装置に米国の Ocean Power Technologies 社が開発した一点吸収型に分類されるパワーブイ（PowerBuoy）がある（図 4.1.16）。

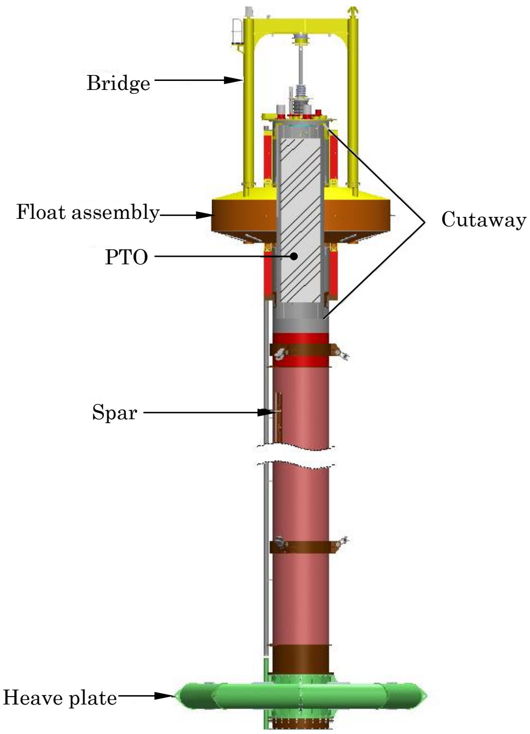


図 4.1.16　パワーブイ
（出典：Ocean Power Technologies 社ウェブサイトの図を一部改変）

米国ニュージャージー州沿岸に定格 40kW 級の初期の試験機を 1 台設置し、2005 年から 2008 年にかけてテストを実施したうえで、2008 年 8 月から稼働しており、台風や 12m 以上の波浪に耐えている。

スペインでは、世界最大の再生可能エネルギー会社イベルドロラとスペイン政府との合弁事業として建設が進められている 1.39MW の波力発電所に採用され、2008 年 9 月に定格 40kW 改良型の装置を設置した。

また、スコットランド・オークニーに定格 150kW の装置を設置予定である。同社は、海底に設置される系統連系機器の開発も進めており、英国コーンウォール沖合ウェーブ・ハブ（Wave Hub）を構成する 4 海区の一つには、これを設置する計画である。

パワーブイのような並進動揺型発電施設は波に対する指向性がなく、他の発電施設に対して波向き影響の点から優位であるといえる。また、構造がシンプルで発電装置も含め大部分が水中に没しているので、浮体本体の構造安全性や信頼性の点から有利である。その一方で、波浪荷重、発電荷重を下端で支えているため繰り返しの係留力が作用することになり、下部の構造強度に配慮する必要性がある。また、発電装置が水面より下側にあることから、上部からの浸水に対しては十分注意を払った構造様式とすることが必要である。

(3) 屈曲動揺型

屈曲動揺型波力発電施設の代表例として、図 4.1.17 にペラミス（Pelamis）と名付けられた減衰型波力発電装置を示す。スコットランドのオーシャン・パワー・デリバリー社が開発している。全長 180m、直径 4m、重量約 1350 トン、4 個の円筒形の浮体をまっすぐ

三つの関節で接続している。波の中では浮体をつなぐ関節の角度が変化し、その角度の変化を油圧に変換する。発電能力は 1 基当たり約 0.75MW である。波向きに対する指向性が強い。また、効果的に発電性能を向上させるためには、波と浮体挙動を連成させる必要があり、結果的に浮体の長さが長くなる傾向にある。

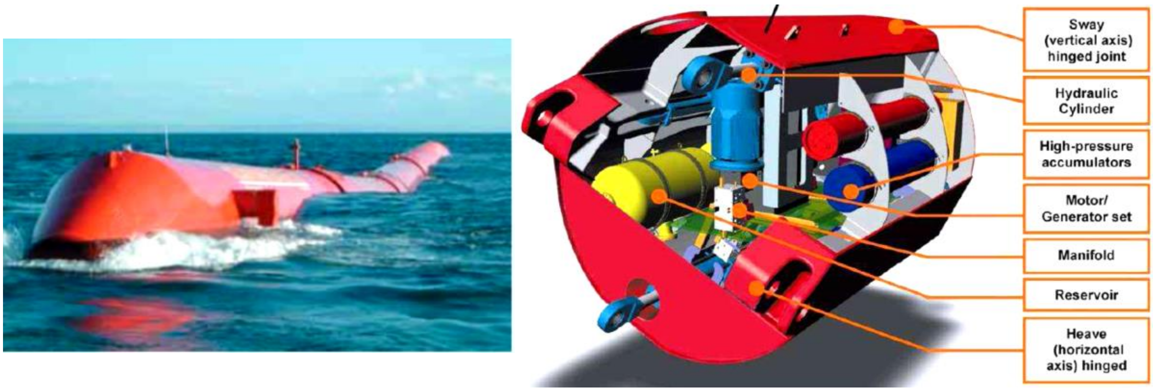


図 4.1.17　Pelamis
（出典：Pelamis Wave Power ウェブサイト）

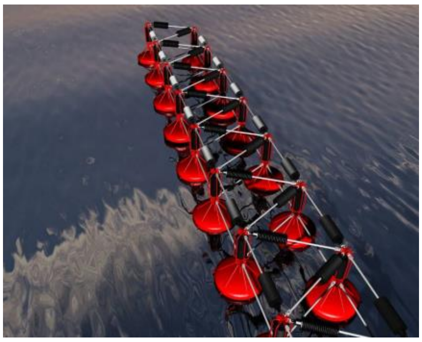


図 4.1.18　EPAM 波力発電装置
（出典：SRI International ウェブサイト）

EPAM 波力発電装置は、米国の研究機関 SRI International が開発した電場応答高分子型人工筋肉（EPAM：Electroactive Polymer Artificial Muscle）を利用した新しい方式の波力発電である（図 4.1.18）。EPAM は、アクリル系やシリコン系樹脂等からなる薄い高分子膜を伸縮可能な電極で挟んだ構造をしている。電極間に電位差が与えられると静電力によって電極が引き合い、高分子膜が収縮し、面方向に伸長する。この駆動モードを逆にすると、膜の歪みにより発電することができる。

EPAM の波力発電への応用は、日本のベンチャー企業 HyperDrive 社が SRI と共同で開発を進めている。カリフォルニア州サンタクルーズの沖合で実証試験を行っており、将来的には約 2kW/モジュールを目指している。

図 4.1.19　OYSTER
（出典：Aqua Marine Power 社ウェブサイト）

図 4.1.19 は、海底設置型の屈曲動揺型波力発電施設、オイスター（OYSTER）である。波による水中水の粒子運動を平板で捉え、往復運動を行うことにより発電する。

海底に設置させながら、波の往復運動を活用する必要があり、発電装置設置の海域及び装置のサイズの観点から制約を受ける場合が多い。また、発電機等、保守の必要な機器が全て水中にあることから運用に際して経費がかさむことが想定される。海流の影響の直接的な抗力、および往復運動を行う可動部の背後に生じる渦励振（VIV：Vortex Induced Vibration）の影響についても十分配慮する必要がある。

(4) 越波型

波は護岸や防波堤などの海岸構造物に衝突すると静水面上よりも高く打ち上がり、また傾斜海岸では遡上していく。一般には、海岸構造物に衝突し打ち上げた海水が構造物の天端を越えて陸側・堤内に流入する現象を越波と呼ぶ。

越波型とは、越波による海水を貯水池あるいは貯水槽等で一時的に貯留し、貯水面と海面との高低差を利用し、排水路にタービンおよび発電機を設置して発電する方式の波力発電装置である。

図 4.1.20 はウエーブドラゴン社の開発した浮体式の越波型発電装置、ウエーブドラゴン（Wavedragon）の例である。片側が越波を考慮した断面形状となっている浮体本体、浮体本体の両側に設置する大きな波の反射板、そしてこれらを係留する装置から構成されており、浮体上部に貯留した海水を排水する際に発電するための低圧タービンと発電機が、排水路に複数設置されている。

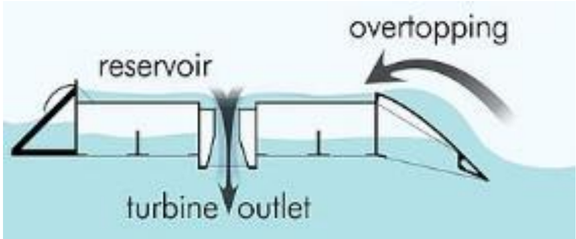


図 4.1.20　ウエーブドラゴン
（出典：Wave Dragon - Wikipedia）

波を集約させる機構を必要とし、発電施設全体が大型化する傾向にある。その際、係留荷重に関して十分な安全性を確保する必要性がある。また、特定方向の波向きが支配的な海域での設置が望ましい。

(5) その他

神吉博らは、図 4.1.21 に示す高速回転中の円板に傾きを与えることにより生じるジャイロモーメント（gyroscopic moment）を利用して、浮体の波による揺れから発電機を回転させる方式である浮体型波力発電装置の検討を行っている。

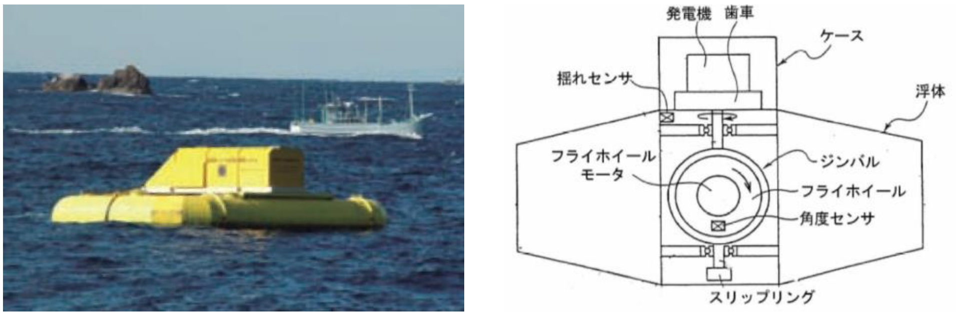


図 4.1.21　ジャイロ式波力発電装置
（出典：（左）科学技術振興機構、2013、（右）神吉博、2006）

羽田野袈裟義らは、つるべ（bucket）式の構成で水面の上下動から一定方向に回転する軸の動力を取り出す波力発電装置「つるべ式波力発電装置」（図 4.1.22）の開発を行っている。滑車にフロート（浮き）と重りを取り付け、フロートは海に浮かべてフロートの上下運動を滑車の回転運動に変換してタービンを回す。

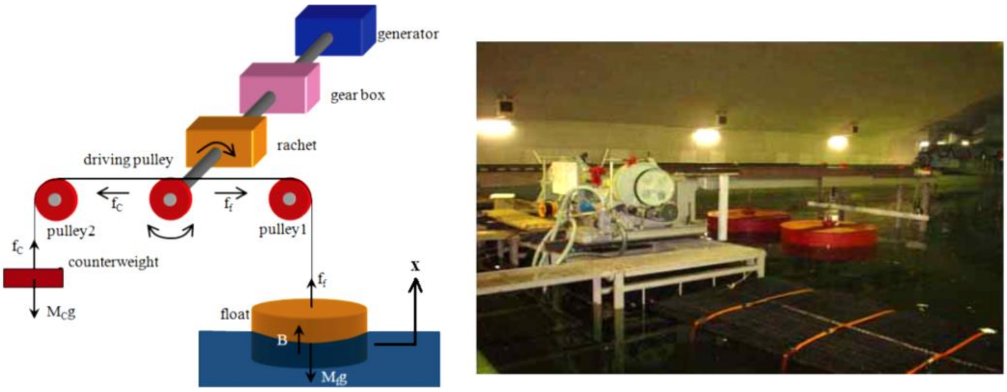


図 4.1.22　つるべ式波力発電装置
（出典：Hadano K. et al.、2013）

4.1.3　発電機構

波力発電装置のエネルギーの取得方法は装置のコンセプト毎に様々であるが、後述するリニア式を除く一般的な波力発電装置は、回転発電機によって電力を生産する。回転発電機は、大きく分けて誘導型と同期型の 2 種類に分けられる。表 4.1.2 は回転発電機の特徴をまとめ

たものである。波エネルギーは、時間的に変動し、かつ、その変動は波周期と同程度のゆっくりしたものである。その為、波力発電装置に搭載する回転発電機は、可変速運転が可能で低速回転でも高い効率を実現できるものが適している。

表 4.1.2　回転発電機の特徴

発電機の種類		発電機運転制御	発電機
誘導型	かご型誘導	一定速運転	高速発電機
	可変抵抗付巻線誘導	部分可変速運転（可変速幅小）	高速発電機
	二次巻線型誘導	部分可変速運転（可変速幅大）	高速発電機
同期型	巻線多極同期	可変速運転	低速または中速発電機
	永久磁石式多極同期	可変速運転	低速または中速発電機

ここでは、波力発電装置が波からエネルギーを受け取り、電力を生産するまでのプロセスを基に、タービン式、油圧式、リニア式の 3 種類に発電機構を分類して図 4.1.23 に示す。図のタービン式は、空気や水流がタービンを回転させ、回転発電機を駆動して電力を生産する。この方式には、振動水柱型波力発電装置や越波型波力発電装置が含まれている。振動水柱型波力発電装置の発電機構の詳細は、4.2 節を参照のこと。

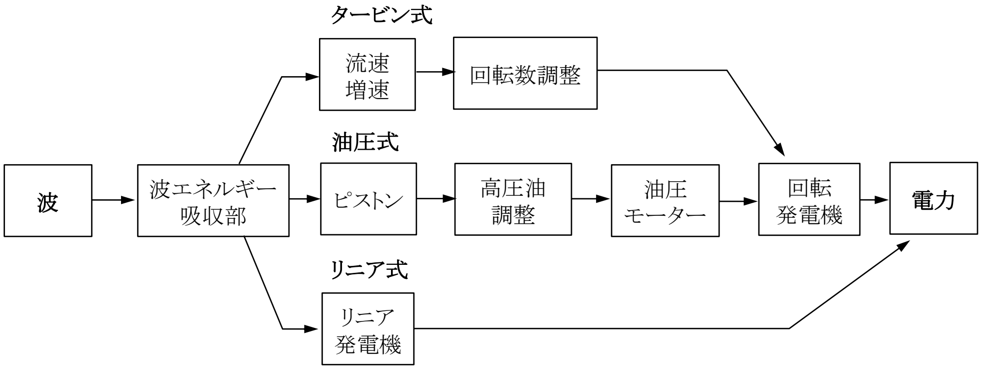


図 4.1.23　エネルギー変換の流れ
（出典：Drew B. et al.、2009 による図を参考に作成）

(1) タービン式

振動水柱型波力発電装置では、空気室を出入りする空気の往復流のパワーを一方向の回転運動パワーに変換することができるウェルズタービン（Wells turbine）、もしくは衝動タービン（impulse turbine）が用いられる。ウェルズタービンは 1976 年に Wells によって、衝動タービンは 1988 年に Kim によって提案されている。

振動水柱型波力発電装置における空気タービンには、タービンの抵抗が小さければ、波のパワーから水柱のパワーおよび空気のパワーへの変換効率は大きくなるが、空気のパワ

一からタービンのパワーへの変換効率は小さくなり、逆にタービンの抵抗が大きければ、波のパワーから水柱のパワーおよび空気のパワーへの変換効率は小さくなるが、空気のパワーからタービンのパワーへの変換効率は大きくなるというトレードオフの特徴があり、総合効率を最大にする抵抗の最適値が存在する。

① ウェルズタービン

これまでの振動水柱型波力発電装置には、ウェルズタービンが多く使われている。ウェルズタービンでは、対称翼をロータの周囲に空気の流れの向きに対して垂直に取り付けることにより、空気が排気と吸気の往復流になっても、ロータが一方向に回転することができる。軸方向の空気の流速とロータの回転に伴う翼の速度の合成により、翼に対する相対速度と迎角が決まる。空力的な揚力と抗力はそれぞれ、相対速度に垂直および平行に発生するが、翼の進行方向とロータの軸方向の成分に分解して、それぞれの方向成分同士を足し合わせた合力で考えた方が以後の話は理解し易い。

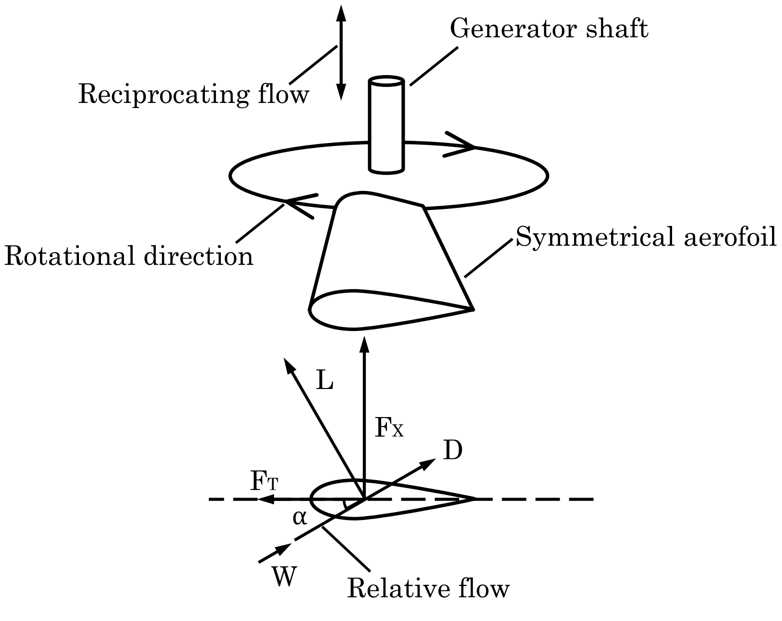


図 4.1.24　ウェルズタービンの対称翼
（出典：Cruz J.、2010 による図を参考に作成）

図 4.1.24 は、ウェルズタービンの対称翼を 1 翼のみ取り出して図示したものである。図中の W は相対速度、L 、D はそれぞれ揚力と抗力であり、翼の進行方向の力 F_T 、ロータの軸方向の力 F_x はそれぞれ次式のようになる。

$$F_T = L\sin\alpha - D\cos\alpha \qquad (4.1.1)$$

$$F_X = L\cos\alpha + D\sin\alpha \qquad (4.1.2)$$

ここで、α は迎角である。

空気が往復流なので、F_x は大きさも向きも周期的に変化するが、一般の稼働範囲では、F_T は大きさのみ周期的に変化し、向きは一定である。発電機の軸まわりに F_T はトルクとして働き、電気を発生させる。なお、翼の進行速度の限界は失速により決まる。また、F_x はロータの軸方向の推力であるが、周期的に大きさも符号も変わるので、適当なベアリングで抗する必要がある。前式を無次元化すると次式で表される。

$$C_T = C_L \sin\alpha - C_D \cos\alpha \qquad (4.1.3)$$

$$C_X = C_L \cos\alpha + C_D \sin\alpha \qquad (4.1.4)$$

流れは 3 次元流れとなり、翼同士の干渉影響もあるので、翼性能は 2 次元流れ中の単体翼のそれとは異なる。一般的に迎角が微小の時は抗力が支配的であり、迎角が大きくなると失速するまでは、揚力が支配的になる。失速点では境界層が翼表面から剥離を起こして、揚力の急激な減少と抗力の急激な増加が生じている。

ウェルズタービンが稼働する翼の迎角の範囲は小さく、一般的に 0～18deg 程度であり、それ以上大きな迎角では失速する。しかし、翼厚を厚くすると、失速する迎角を大きくすることができる。

② 衝動タービン

波力発電への衝動タービンの利用は、1988 年に初めて提案された。衝動タービンの回転軸は、基本的にはダクトを流れる空気流の向きと一致しているが、ロータの前後の空気の流れは図 4.1.25 のようにガイドベーン（guide vane）によって整流されている。ガイドベーンに沿って流れた空気流を中央に存在するタービンブレードにぶつける、すなわち空気の衝動力（力積）を受けてタービンが回転することに名は由来している。

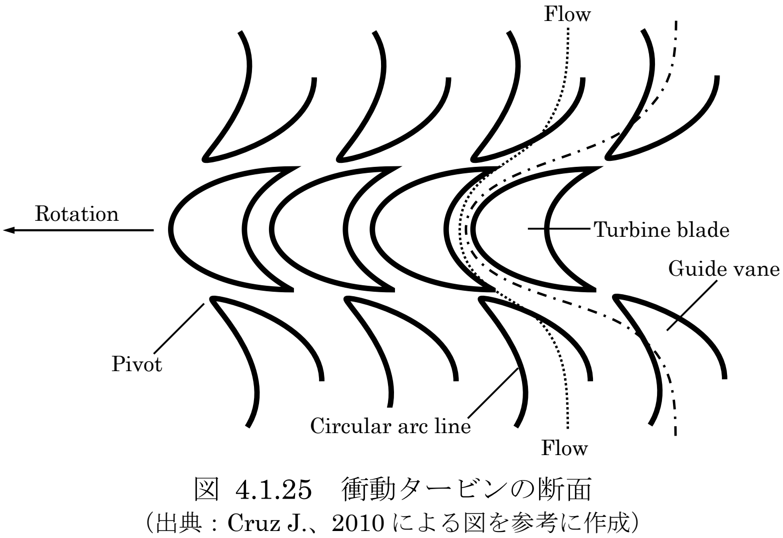


図 4.1.25　衝動タービンの断面
（出典：Cruz J.、2010 による図を参考に作成）

最大のパワーを得るためには、上流と下流のガイドベーンの角度は異なる必要がある。吸気と排気によって流れの向きが変わることに伴って、上流と下流のガイドベーンの角度が自動的に最適な角度に変化するようにするには、ピボット機構を用いる。しかし、保守の観点からすると機構が複雑すぎるので、効率はある程度犠牲にしても固定したガイドベーンを採用する選択肢もある。ガイドベーンが動くタイプでは、ガイドベーンの最適角度は上流では15～17.5deg、下流では55～72.5degであり、ガイドベーンが固定タイプでは30degである。

ウェルズタービンと衝動タービンは、形状が異なるので単純には比較できないが、一般に、以下の違いがある。

・衝動タービンの最適な流量係数は、ウェルズタービンのそれよりも大きい。
・衝動タービンは自動的に回転がスタートするが、ウェルズタービンはしづらい。
・衝動タービンは失速しないので、流量係数が大きくなっても高効率を維持するが、ウェルズタービンは失速点を持つ。
・圧力と流量の関係は、衝動タービンは非線形であり、ウェルズタービンはほぼ線形である。

衝動タービンの最適な流量係数が大きいということは、ウェルズタービンに比べて、同じパワーならタービンが小さくてすみ、ロータの回転速度も小さくてすむということである。また、衝動タービンが失速しないということは、ウェルズタービンに比べて衝動タービンは静かということであり、近くに住宅があるような場合には、衝動タービンの方が好ましい。一方、回転数が小さければ風損も小さくなるが、フライホイールを用いたエネルギーの保存容量も小さくなるので、大容量のエネルギーを保存し、一定で出力したければ、ウェルズタービンの方が好ましい。

(2) 油圧式

油圧式の発電機構の例を図 4.1.26に示す。図の油圧回路では、可動物体が複動形の油圧シリンダに接続されており、水面上の可動物体の往復動により圧油が生成され、チェック弁、蓄圧器、流量制御弁を介して油圧モータを駆動させる。この様な油圧回路の場合、可変容量形油圧モータを使用することで圧油の流量が変化しても発電機を定格回転数に近い回転数で回転させることができる。可動物体に入射する波が正弦波の場合、油圧シリンダの片側のポートから吐出される圧油の流量も正弦波に近い波形となる。油圧回路中の圧油は、チェック弁により整流化され、蓄圧器に流入する圧油の流量は、図 4.1.27の様な波形となる。高圧側の蓄圧器は、変動する圧油を一時的に貯蔵して平滑化する役割と油圧モータに一定流量の圧油を供給する役割がある。低圧側の蓄圧器は、油圧回路上の低圧部に圧油を供給し、キャビテーション（cavitation）を防止する役割がある。

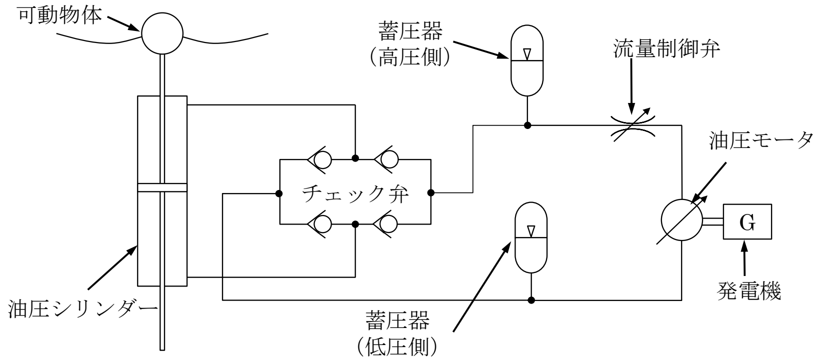


図 4.1.26　油圧式発電機構の例
（出典：Drew B. et al.、2009 による図を参考に作成）

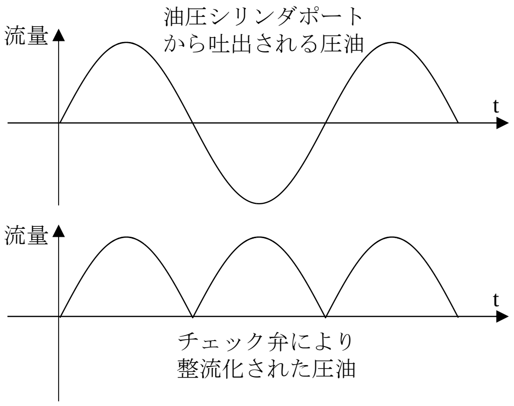


図 4.1.27　チェック弁による圧油の整流化
（出典：Drew B. et al.、2009 による図を参考に作成）

① 油圧式の利点

一般的に油圧アクチュエータ（hydraulic actuator、油圧シリンダ、油圧モータ等）は、ゆっくり大きな力を発生させることが得意である。したがって、油圧式機構は、ゆっくりと大きな力で変動する波エネルギーの吸収に相性が良いと考えられている。また、同規模の出力を得る場合、図 4.1.28 に示すように、油圧モータの方が電動モータに比べてサイズを小さくできる点も利点として挙げられる。

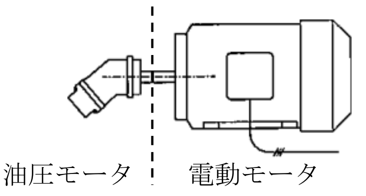


図 4.1.28　定容量形油圧モータと電動モータの大きさ比較（1500rpm, 110kW）
（出典：Cruz J.、2008 による図を一部改変）

② 油圧式の欠点

一方、油圧式発電機構にもいくつかの欠点がある。主なものを以下に記載する。

a)作動油漏れ

油圧式発電機構の場合、作動油の漏洩対策が非常に重要となる。例えば、英国貿易産業省（DTI：Department of Trade and Industry）は、現行の波力発電技術をレビューし、油圧式発現機構に関して環境保全および性能維持の観点から、油ではなく水もしくは環境にやさしい流体を作動油として用いる発電機構の研究開発の実施を推奨している。近年では様々な生分解性の流体が入手可能であるが、これらを作動油として用いる場合は、油圧回路の各構成要素およびシールとの適合性を十分に考慮する必要がある。

b)波力発電装置に適したシール

一般的な油圧アクチュエータに取り付けられるシールは、可動物体の運動速度よりも遅い速度域で設計されている。アクチュエータが高速で動く事で、アクチュエータの温度が上昇し、作動油の性質が変化すること、シールに働く摩擦抵抗が増大し、シールの擦り切れが発生しやすくなること等が起こり、結果として保守作業回数が増加するというデメリットが生じる。

c) 効率

一般的な油圧トランスミッション（hydrostatic transmission）では、可変容量形モータと組み合わせて用いられることが多く、理想的な変換効率は定格運転状態で 80%程度である。しかし、定格運転状態を外れると性能が急激に悪化する。油圧式発電機構は、高い定格出力を持つが、定格出力で運転される頻度は高いとは言えない。したがって、部分負荷運転効率が高い発電機構を構築しなくてはならない。さらに、チェック弁や流量制御弁で生じる圧力降下も効率を減じる要素になる。

d)エンドストップ

油圧シリンダが使われる場合、ストローク（stroke）の両終端でピストンがカバーと衝突して機械的ショックを起こすことがある。ショックは、機械装置、油圧回路を構成する機器に大きなダメージを与える可能性が高く、極力低減する必要がある。

③ 油圧式発電機構が採用された波力発電装置の例

a)Wave Star

Wave Star A/S は、2009 年 9 月から出力 600kW の 1/2 スケール試験機を用いて、デンマーク、ハンストホルムにて発電試験を行っている（図 4.1.29）。この試験機は、2010 年 2 月から系統にも接続されている。また、Wave Star A/S は、EU Horizon2020 によ

る研究助成事業 UPWAVE にも参画している。当該事業では 1MW の商業化実証機をベルギー国内のウィンドファームに建設する計画である。

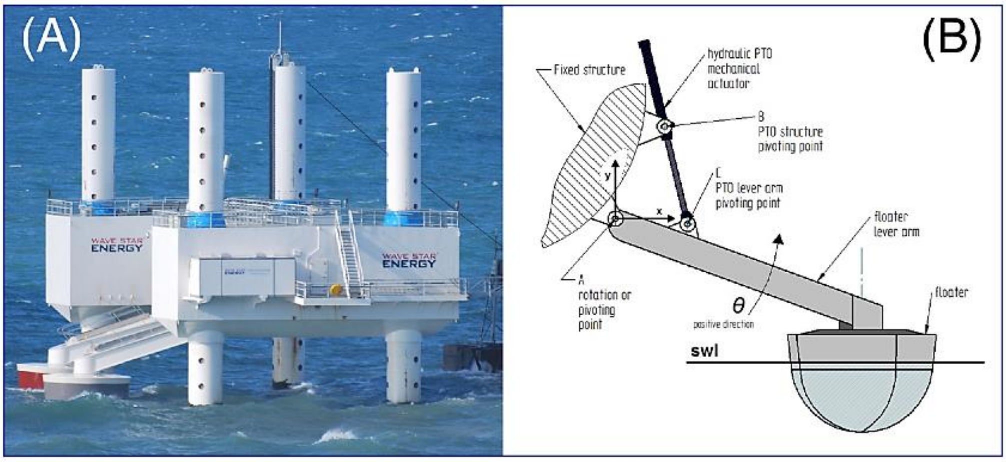


図 4.1.29　1/2 スケールプロトタイプ機（左）、可動物体と油圧シリンダ（右）
（出典：Ferri F. et al.、2014）

b)Azura

Northwest Energy Innovations, LLC は、油圧式発電機構を備えた浮体式波力発電装置の実海域試験を 2015 年 5 月から米海軍波力発電装置試験場（WETS：US Navy's grid-connected 30 meter Wave Energy Test Site）にて実施している。図 4.1.30 のように、2 本の柱の間にある浮体がクランク機構と連結されており、クランク機構は柱内部の油圧シリンダに接続されている。波の力で浮体が回転運動することで、油圧シリンダが駆動される仕組みである。

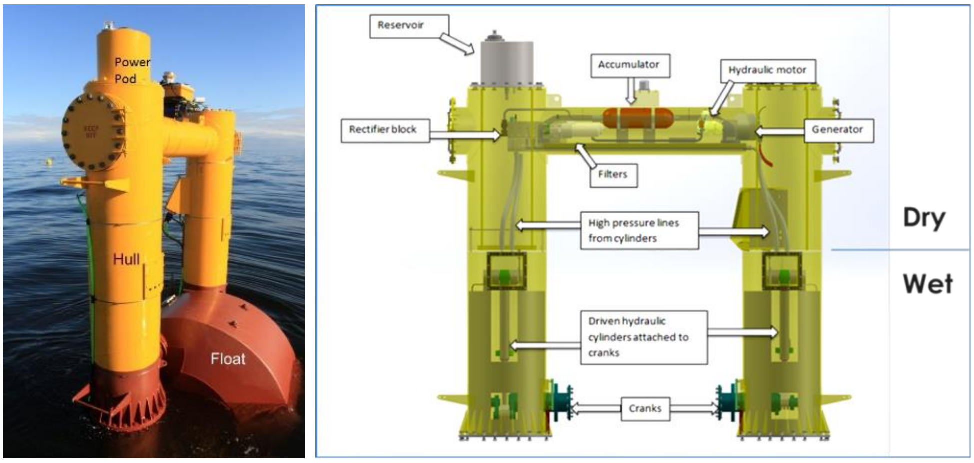


図 4.1.30　浮体式波力発電装置 Azura
（出典：Northwest Energy Innovations ウェブサイト）

c) Pelamis（ペラミス）

Pelamis Wave Power 社は、油圧式発電機構を備えた浮体式屈曲動揺型波力発電装置を開発した。2004～2007 年にかけて Pelamis P1 の実海域試験を EMEC で実施（図 4.1.31）。その後、E.ON 社からの発注を受け Pelamis P2（出力 750kW）を開発・製造した。Pelamis P2 は、2010 年から 3 年間、再び EMEC にて実海域試験を行っている。2014 年 12 月、同社は破産申請を行った。現在、Pelamis P2（P2-002）は EMEC にてテストリグとして利用が検討されている。

ペラミスは、ヒンジ部に合計 4 本の油圧シリンダを有し、ヒンジ部は 2 軸の回転運動を行うことができる。

図 4.1.31　Pelamis P2 の全体（上）および油圧発電機構（下）
（出典：Pelamis Wave Power ウェブサイト）

(3) リニアダイレクトドライブ式

リニアダイレクトドライブ式発電機構（direct-drive linear motor）の例を図 4.1.32 に示す。図のトランスレータ（translator）には、N 極、S 極の永久磁石が交互に配置されている。可動物体はトランスレータに直結されており、波の力で上下に運動する。なお、トランスレータと固定子（電機子）の間の空間をエアギャップ（air gap）という。トランスレータと固定子の相対運動によって、固定子の磁界が変化し誘導起電力が生じる（ファラデーの電磁誘導の法則）。

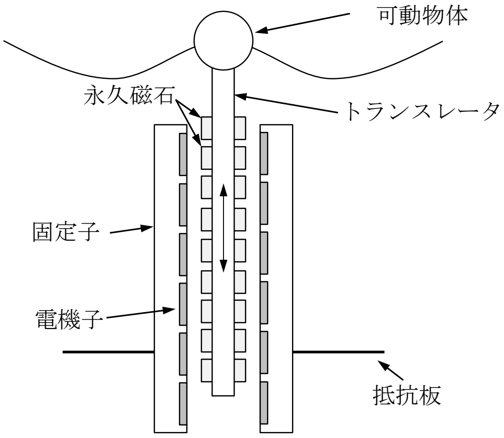


図 4.1.32　リニア式発電機構の例
（出典：Drew B. et al.、2009 による図を参考に作成）

当方式は、並進動揺型波力発電装置への適用例が多く、図 4.1.33 に示した 4 形式の研究開発が行われた。(a)～(c)では、トランスレータを取り付けた可動物体が、水面上を上下に運動する。一方、固定子は、トランスレータに対して動きにくい系に組み込まれている。(a)では、海底に固定された構造物に、(b)では、セミサブ型浮体等の上下方向の波浪強制力が小さい浮体構造物に、(c)では、ヒーブプレート（heave plate、上下揺れ減揺装置）が取り付けられた構造物に組み込まれる。

並進動揺型波力発電装置の場合は、波浪強制力を駆動力とし発電機構はダンパーの働きをする。波エネルギー吸収量はダンパー設定に大きく依存する。最適なダンピングの設定値は多くの要素で決まる。例えば、発電機構の大きさや重さ、可動物体の運動速度である。

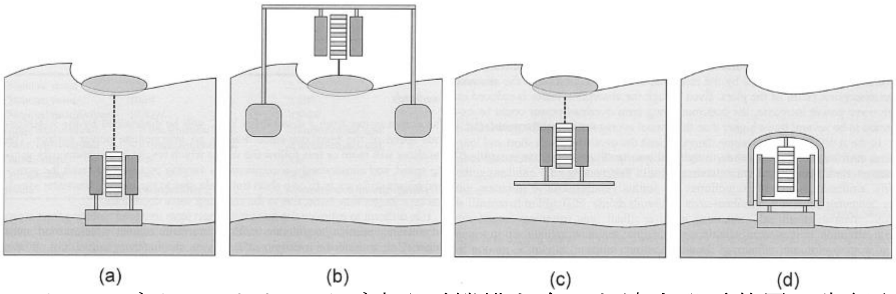


図 4.1.33　リニアダイレクトドライブ式発電機構を有した波力発電装置の先行研究例
（出典：Cruz J.、2008）

① リニアダイレクトドライブ式の利点

図 4.1.33 を見ればわかるように、タービン式および油圧式に比べ、リニアダイレクトドライブ式は、波エネルギーを電気エネルギーに変換する工数が少なく、シンプルな変換機構である。その為、エネルギー変換に関わる部品点数を他の方式に比べて少なくできる。これにより、潜在的に、信頼性の向上やメンテナンスの回数が少なくて済む可能性がある。

② リニアダイレクトドライブ式の欠点

リニアダイレクトドライブ式発電機構にもいくつかの欠点がある。主なものを以下に記載する。

a)低速運転と高反力

可動物体とトランスレータが直結されている為、トランスレータの運動速度は水面の上下動の速度と同じ 1～2m/s 程度である。これは、一般的な同期発電機（回転式）の適切な運転速度の約 15～50 分の 1 である。したがって、リニアダイレクトドライブ式発電機で一般的な同期発電機と同じ出力を取り出す際の反力は、同期発電機の 15～50 倍となる。その為、リニアダイレクトドライブ式発電機の大きさは、出力が同規模の同期発電機に比べて大型化する。

b)過負荷対策

リニアダイレクトドライブ式発電機は、エネルギーの貯蔵機構を持たないので、出力はトランスレータの時々刻々の運動速度で決定する。トランスレータが直結される可動物体は水面を追随する為、可動物体とトランスレータ運動速度も時々刻々と変化し、発電機の出力も常に変化する。このことから、発電機の出力は短い時間で大きく増減する場合もありうるし、荒れた海象が一定時間続けば高出力の状態が持続する可能性もある。荒天時は、可動物体が大きく速く運動し、短い時間で過負荷状態となる。

この様な出力の急な増減は、電圧安定度の観点、整流器および変換器に対して厳しい作動条件となる。また、荒れた海象が一定時間続き高出力状態が続けば、機器からの排熱についても考慮する必要がある。

c)ストローク

トランスレータのストローク長は、想定する波高に適合するように決められる（概ね数 m の範囲）。このストローク長は、他の産業で位置決め等に用いられるリニアアクチュエータに比べて長くなる。また、トランスレータが運動する際の磁界変化率を一定とするため、トランスレータは固定子よりも長く作られる。

③ リニアダイレクトドライブ式発電機構が採用された波力発電装置の例

a)W200

Wedge Global 社は、創業者グループがスペイン州政府の協力・出資を得て、2008 年に創業した波力発電デバイスの企業である。独自に開発したリニア・スイッチト・リラクタンス（LSR）発電機により、フロートのサージ運動を油圧や機械的ギヤを用いず直接的に電気変換する。第 1 号実証試験機 W200（最大出力 200kW）は、2014 年 2 月からスペイン領カナリー諸島の実証試験場 PLOCAN にて実証試験を行った（図 4.1.34)。

図 4.1.34　（左）W200、（右）W200 に搭載された発電機構
（出典：Wedgeglobal 社ウェブサイト）

b)Seabased wave energy

Seabased wave energy 社は、スウェーデンのウプサラ大学と共同で着底式リニアダイレクトドライブ式波力発電装置（図 4.1.35）の試験を 2006 年以降 Lysekil research site（スウェーデン）にて実施している。

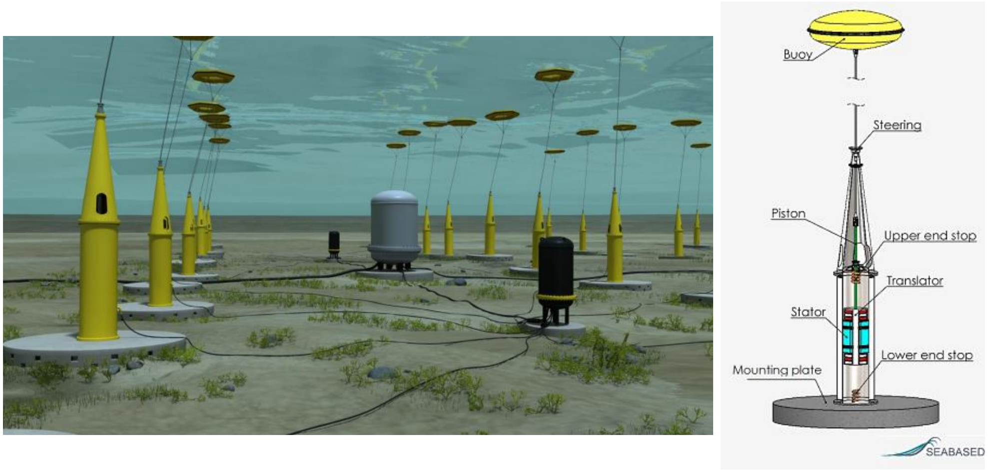


図 4.1.35　Seabased wave energy 社の波力発電装置
（出典：Seabased wave energy 社ウェブサイト）

4.2 振動水柱型

4.2.1 波エネルギー吸収の基本メカニズム

振動水柱型（OWC）波力発電装置とは、波力の作用により、容器（空気室もしくは水室）中の水塊（水柱）を往復運動させ、それに伴う容器内の空気の往復運動のエネルギーをタービンと発電機を用いて電気に変換する装置のことである。この装置は基本的には構造体としての可動部を必要とせず、可動物体型に比べて構造強度上有利である。

振動水柱型波力発電装置の一番シンプルな形状は、図 4.2.1 に示すように軸対称であるが、このような空気室の 2 次元状態における理論的な最大波エネルギー吸収効率は 50%にとどまる。しかし、これを図 4.2.2 に示すような「底板」および「ハーバー」を取り付けて非対称にすることにより、2 次元状態で理論的な最大効率は 100%に達する（前田ら、1982、堀田ら、1987）。

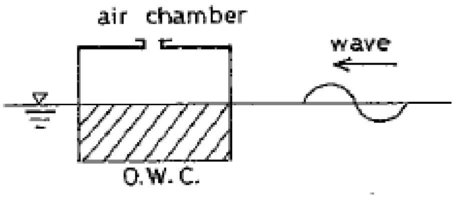


図 4.2.1　一般的な空気室

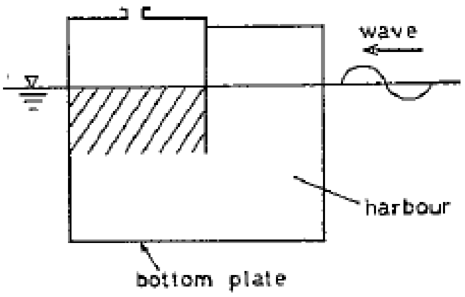


図 4.2.2　ハーバー付きの空気室

（出典：堀田平等、1987）

装置の長さ幅比が 1 に近く、装置の寸法が波長に比べて十分小さい場合、振動水柱型波力発電装置はポイントアブソーバと呼ばれる。ポイントアブソーバ単独では大きなエネルギーを得ることは困難であるが、ポイントアブソーバを組み合わせて配列を作るならば、大規模発電も可能となる。

ポイントアブソーバを直線状に配置した細長い構造体を考えた場合、これを入射波に対して直角に配置すれば、入射波をさえぎる堤防と見なすことができるので、ターミネータ（terminator）とも呼ばれる（図 4.2.3）。逆に、波の入射方向に配置すれば、入射波の振幅が装置の長さ方向に沿って減衰するところからアッテネータ（attenuator）とも呼ばれる（図 4.2.4）。

ターミネータはアッテネータに比べて広範囲の波を捉えることができるが、同時に波から受ける荷重も大きくなる。強度を高くする他、浮体式の場合には係留系も強くすることが必要になる。なお、エネルギー吸収特性に及ぼす係留の影響については、係留索の張力が小さな係留状態（スラック係留）であるほど、浮体運動の影響によって吸収特性が低下する傾向にあると言われている（前田ら、1982）。ただし、波周期によっては、固定型装置に比べてエネルギー吸収特性が高い場合もある。

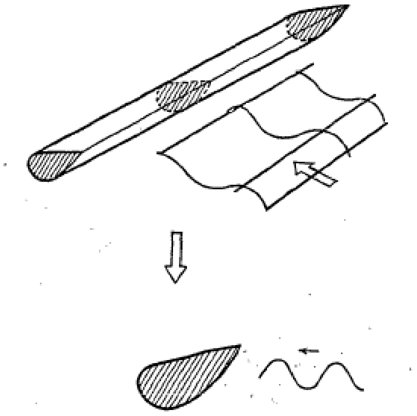


図 4.2.3　ターミネータのイメージ
（出典：前田久明、山下誠也、1982）

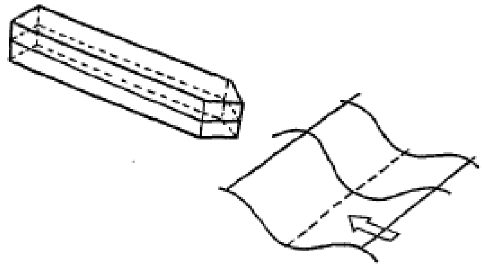


図 4.2.4　アッテネータのイメージ
（出典：前田久明、山下誠也、1982）

先に紹介した「海明」はアッテネータの例である。図 4.2.5 に示すように、海明では波の進行方向に複数の空気室が配置されている。

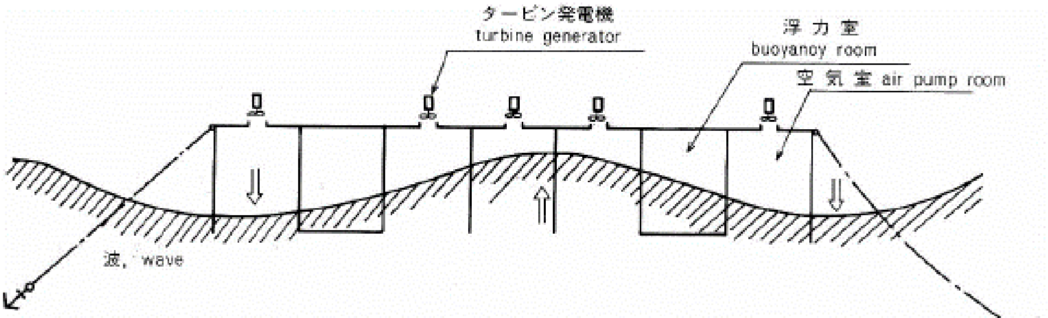
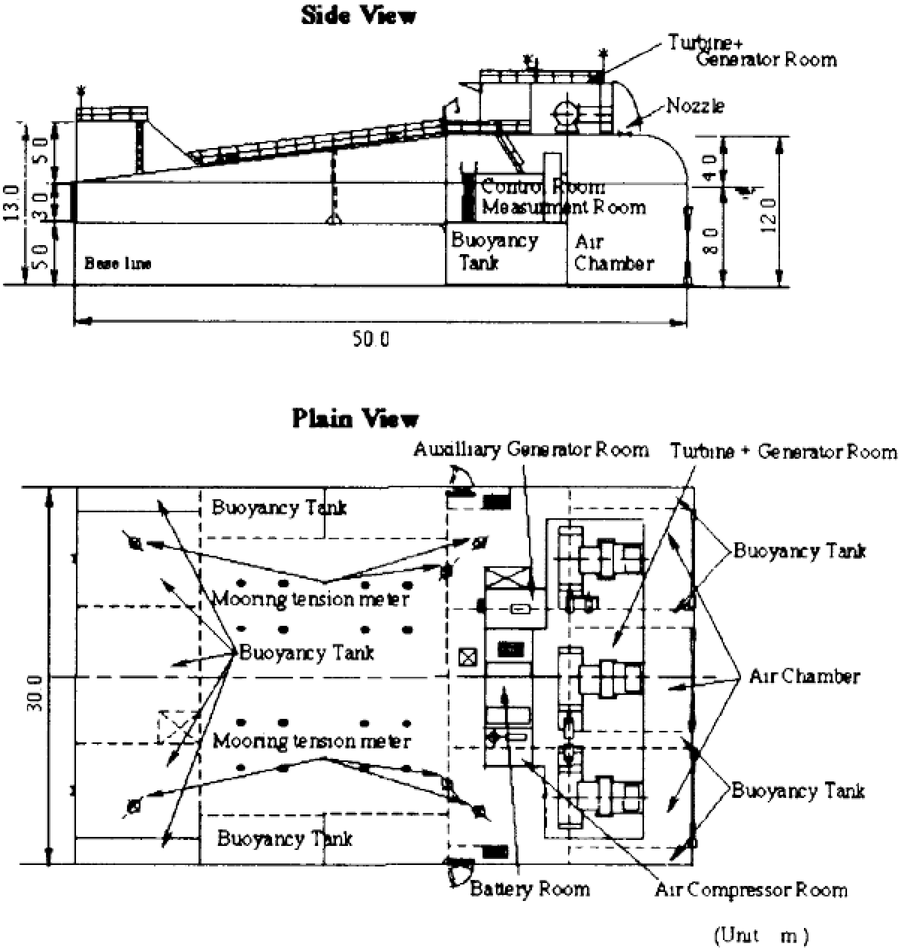


図 4.2.5　海明における空気室の配置
（出典：益田善雄、宮崎武晃、1979）

一方、「マイティーホエール」はターミネータの例である。図 4.2.6 に示すように、マイティーホエールでは、三つの空気室が波の来襲方向（図の右側）に向けて配置されている。



"Mighty Whale" Hull

Length	50.0m	Draft	8.0m
Bredth	30.0m	Displacement	4,380ton
Depth	12.0m	Light veight	1,290ton

図 4.2.6　マイティーホエールの一般配置
（出典：鷲尾幸久 2001）

海明およびマイティーホエールは、ポイントアブソーバを組み合わせて配列を作ることによって、発電量を増加させようとした。一方、ポイントアブソーバ単体の効率向上を図ったのが、BBDB である。BBDB の模式図を図 4.2.7 に示す。BBDB は、浮力体、L 字型ダクト、タービン発電部から構成される。BBDB に波が入射すると、入射波のエネルギーは船体後方の開口部からダクトに伝搬し、ダクト内空気室の空気を圧縮するようになっている。この段階を一次変換と呼ぶ。圧縮され高圧になった空気はタービンを回転させ発電する。この段階を二次変換と呼ぶ。

BBDB の特徴として、沿岸設置型に比べて浮体と水室内の水柱の共振時に空気圧力が非常に高くなり、発電効率の増加が見込めること、さらに装置自体が小型で浅い海でも使用可能

であること、が挙げられる。その一方で、発電効率を上げるために空気室容量を増す必要があるが、それに伴い浮力体が大きくなる傾向にある。荒天中においても破損しない強固な係留方式、係留余裕が必要となる。

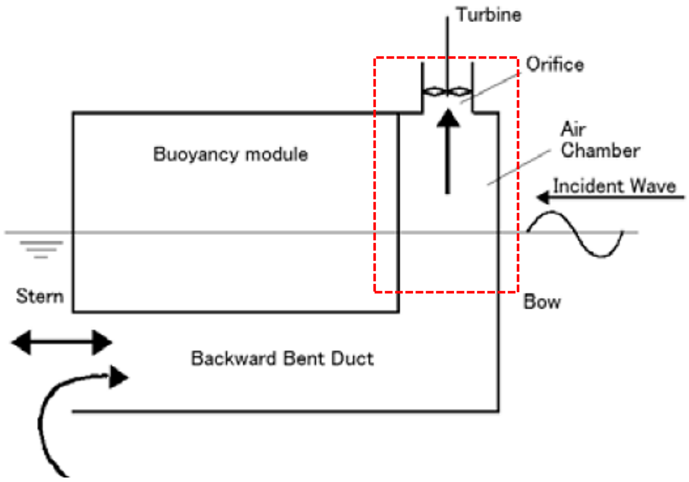


図 4.2.7　BBDB の模式図
（出典：今井康貴等、2012 による図を一部改変）

振動水柱型波力発電装置において、波力から電気エネルギーへは、図 4.2.8 のような変遷をする。

波力エネルギー
↓
水柱の位置及び運動エネルギー
↓
空気の運動エネルギー
↓
タービンの運動エネルギー
↓
電気エネルギー

図 4.2.8　振動水柱型のエネルギー変換

エネルギー変換効率は、単位時間当たりのエネルギー、すなわちパワー（単位 W）で考える。波力パワーから空気の運動パワーまでの変換効率を一次変換効率 η_1、空気の運動パワーから電気パワー（電力）への変換効率を二次変換効率 η_2 といい、波力パワーから電気パワーまでの総合変換効率 η は、次式で求まる。

$$\eta = \eta_1 \eta_2 \tag{4.2.1}$$

図 4.2.9 に海明の 1/20 縮尺模型の一次変換効率を示す。ここで、横軸は波長/本体長である。図 4.2.10 にマイティーホエールの模型の一次変換効率を示す。海明の模型に比べて、一

次変換効率が改善されていることが判る。図 4.2.11 にはマイティーホエールの実機の一次変換効率を示す。模型実験の結果と比べて、ピーク周波数は一致するが、最大値は 15%程度の差がある。

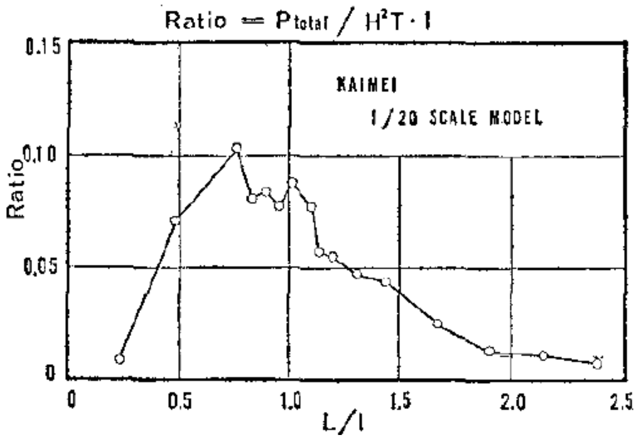


図 4.2.9　海明の 1/20 縮尺模型の一次変換効率
（出典：宮崎武晃等、1981）

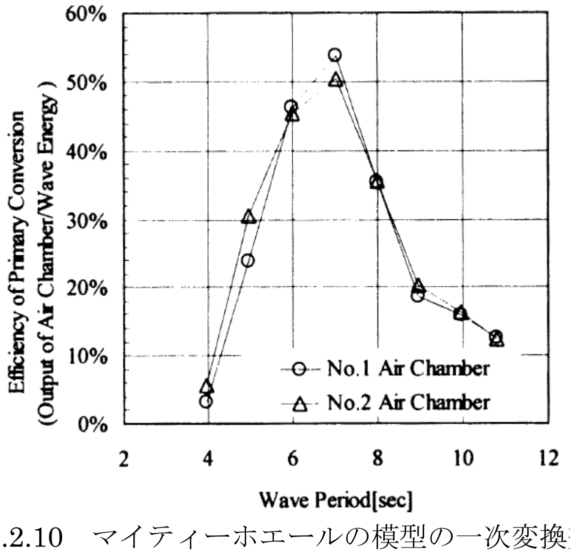


図 4.2.10　マイティーホエールの模型の一次変換効率
（出典：鷲尾幸久等、2001）

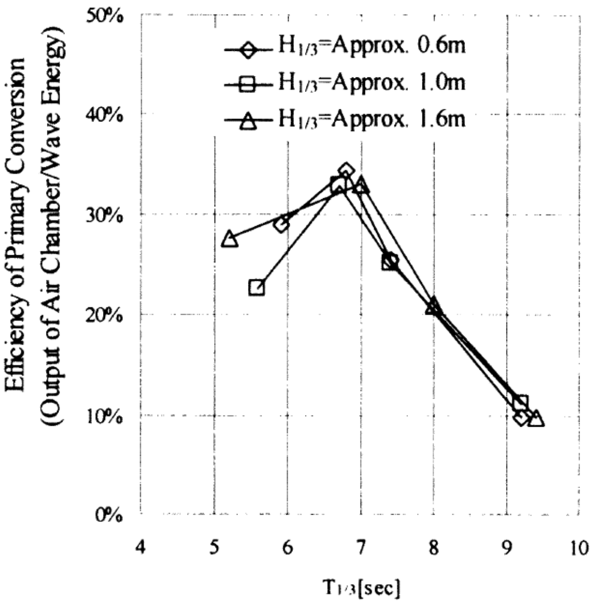


図 4.2.11　マイティーホエールの実機一次変換効率
（出典：鷲尾幸久等、2001）

4.2.2 数値計算技術

実海域を想定した波浪条件下における浮体式振動水柱型波力発電施設の水柱の運動、浮体の挙動、係留部の荷重の計算方法を述べる。

(1) ポテンシャル理論に基づく数値計算法

計算機の性能がまだ十分でなかった頃には、なるべく少ない未知数で精度の高い流体力の計算ができるように数理解析を駆使しながら、線形ポテンシャル理論に基づいた境界要素法（BEM：Boundary Element Method）、多重極展開法（multipole expansion）、固有関数展開法（eigenfunction expansion method、領域分割法）等の独創的な数値計算法が開発・実用化された。最近は高速の電子計算機が安価に使えるようになってきたので、差分法によって NS 方程式を数値的に解く、いわゆる CFD による非線形問題の研究が行われている。しかし、ポテンシャル理論に基づく数値計算法は、計算時間が短く、計算精度に対する信頼性や安定性の点で優れており、依然として海洋流体工学の研究における基本かつ重要なツールである。詳しくは参考資料「日本造船学会海洋工学委員会性能部会．実践 浮体の流体力学 前編－動揺問題の数値計算法」を参照のこと。

固有関数展開法を用いて、図 4.2.12 に示すようなマイティーホエール型浮体式振動水柱型波力発電施設の空気室内圧力、空気室内の波面上下、一次変換効率等を計算し、実験結果と比較して良好な一致が見られた。

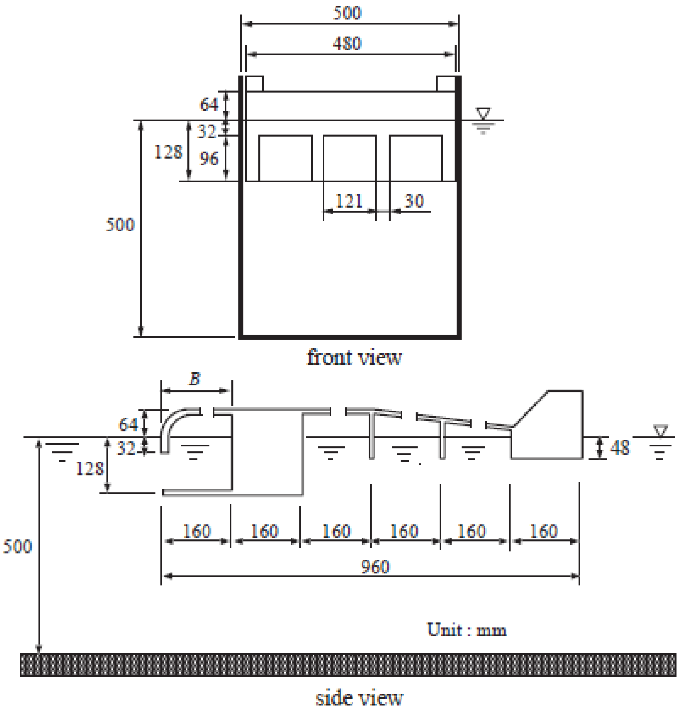


図 4.2.12　マイティーホエール型浮体式振動水柱型波力発電施設
（出典：Suzuki M.et al.、2005）

境界要素法（境界積分方程式法、積分方程式法、グリーン関数（Green function）法、パネル法とも呼ぶ）を用いて、図 4.2.13 に示すような BBDB の空気室内圧力、空気室内の波面上下、一次変換効率等を計算し、実験結果と比較して良好な一致が見られた事例も存在する。

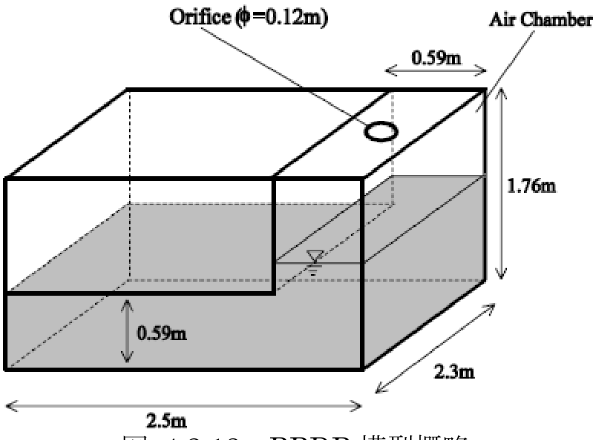


図 4.2.13　BBDB 模型概略
（出典：今井康貴等、2012）

(2) CFD

CFD は、連続流体の運動方程式である NS 方程式をエネルギー保存式や質量保存式などと連成させて数値的に解く手法である。物体運動や荷重分布に加えて、物体周りの流れ（流速や圧力など）を実験なしに評価できる。CFD では計算対象の幾何形状を離散化する必要

があり、様々な離散化手法が存在する。物体形状および周りの空間を計算格子（メッシュ）で表現する方法として有限差分法（FDM：Finite Difference Method）、有限体積法（FVM：Finite Volume Method）、有限要素法（FEM）があり、メッシュを生成せず流体を粒子の集まりして表す粒子法といった方法もある。その中でも有限体積法は複雑な物体形状にも適用な可能であるため航空機・自動車・造船業界等で広く利用されており、公開されている CFD コードも多くはこの手法である。

図 4.2.14 に、1 周期を 4 等分した空気室内の圧力分布の計算結果を示す。理論式と異なり、実際には圧力分布に濃淡が出るので注意が必要である。

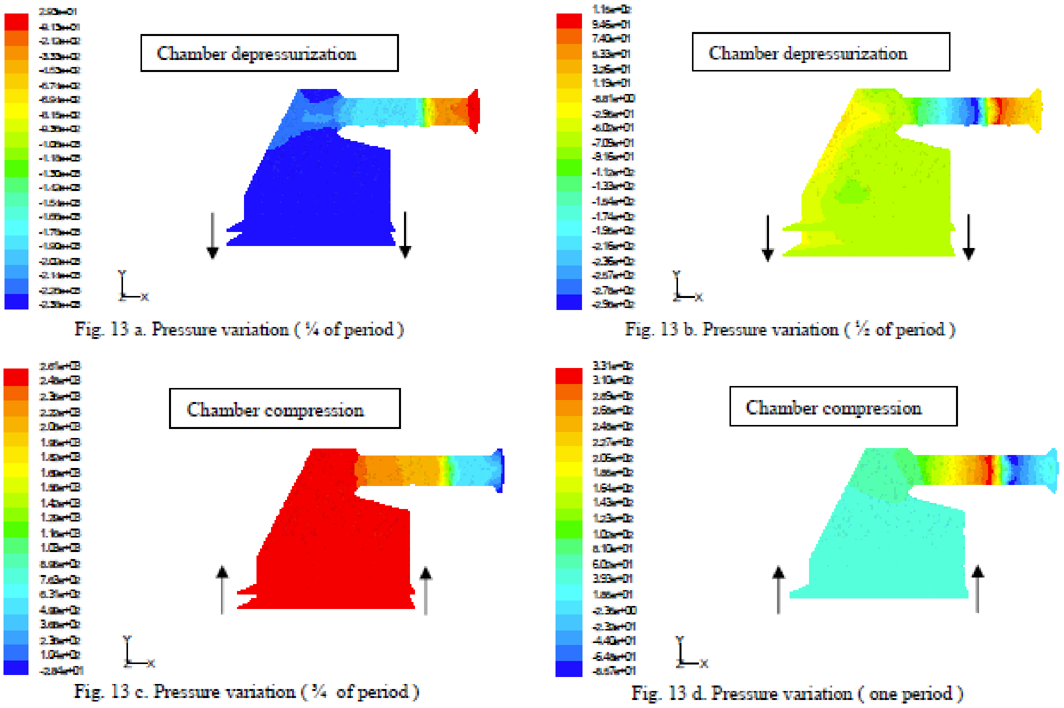


図 4.2.14　空気室内の圧力分布
（出典：Marjani A. et al.、2006）

笹原裕太郎らは粒子法を用いて、沿岸固定式 OWC である LIMPET の一発大波に対する入射波水位、入射波衝突時の飛沫形状、波荷重等を計算し、気液二層流非線形現象を十分に表現している。

(3) 機構解析

振動水柱型浮体式波力発電施設の力学を考える場合、空気室および発電機構が、バネと減衰機構（ダンパー）を直列につないだ Maxwell モデルで表現することができる。この項では、機構解析の面から、Maxwell モデルにおける浮体運動および位置保持荷重（係留張力）等の評価法の概略を述べる。浮体の流体力等は、従来の海洋構造物と同様に考える。例として、BBDB 型発電施設をとり上げる。

機構解析の計算対象は、構造物全般であり、通例行われる線形範囲の振動解析とは異なり、非線形範囲となる大変位の挙動も扱うことができる。したがって、構造物の運動、係

留張力等の時間領域シミュレーションを行うことにより、構造物の性能評価、および安全性評価を行うことができる。

汎用ソフトウェアを用いたシミュレーション手順としては、ボディ、フォースなどの選択式のパーツを組み合わせたモデルのパラメータ値を入力して、計算を実行させれば良い。浮体式波力発電施設に応用するためには、時々刻々の流体力を計算条件として与えるためのダイナミックリンクライブラリ（DLL：Dynamic Link Library）を作成する必要があり、そこで用いる波周期毎の流体力データは、流体力計算用ソフトウェアで別途求める。

振動水柱型波力発電施設の数値計算モデルは、浮体、内部水面、係留および空気室と発電機（オリフィス（orifice）で代替）を Maxwell モデルで表現したバネ、ダンパーで構成される。すなわち、浮体の運動とバネ、ダンパーの干渉影響を受けた内部水面の 2 体連成問題を機構解析により計算する。機構解析モデルの概念図を座標系も含めて図 4.2.15 に示す。

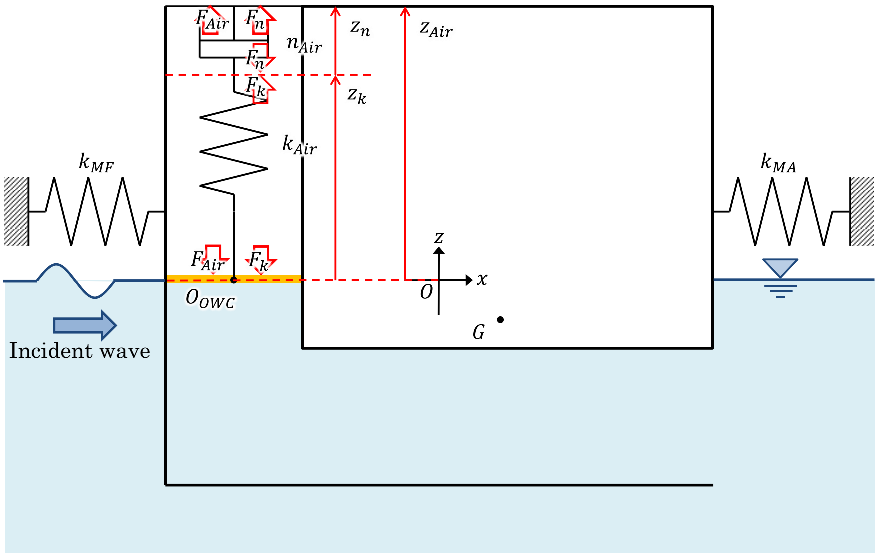


図 4.2.15　BBDB 機構解析モデル概念図
（出典：平尾春華等、2017）

4.2.3 水槽実験技術

浮体式波力発電施設の振動水柱型波力発電装置に関する水槽試験は様々な目的に行われるが、ここでは実海域を想定した波浪条件下、係留部の荷重、浮体の挙動、水柱の運動を計測し、荷重等の設定の検討に必要なデータの収集を行う方法を述べる。

(1) 供試模型

振動水柱型波力発電施設模型は、波の力で運動する水柱、水柱の運動を空気の流れに変換する空気室、および発電タービンを模擬するオリフィス、および実機との相似則を満たし空気室の空気バネの影響を正しく評価するための拡張空気室が必要であるが、ここでは図 4.2.13 に示す一般的な拡張空気室無しの BBDB 模型を例示する。

設置写真を図 4.2.16 に示す。また、水槽セッティング例を図 4.2.17 に示す。

図 4.2.16　BBDB 設置写真
（出典：今井康貴等、2012）

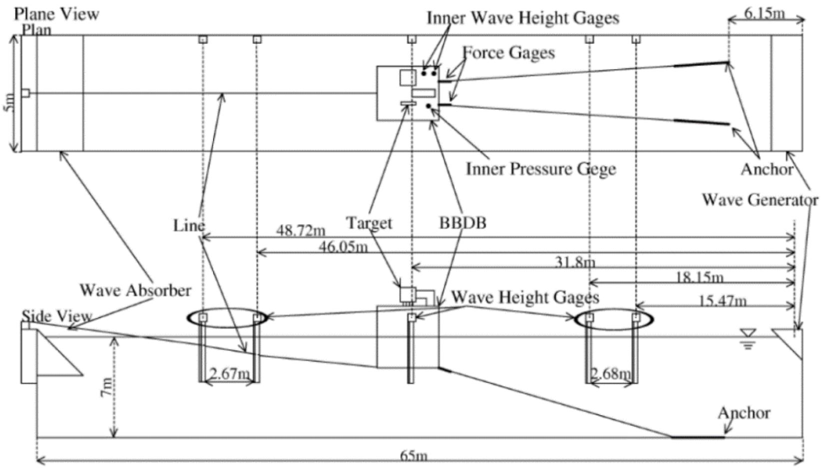


図 4.2.17　BBDB の水槽セッティング例
（出典：今井康貴等、2012）

(2) 計測

水槽実験では、次のような項目の計測を行うことが望ましい。

・波
 – 入射波高および入射波周期
 – 内部水柱相対変位
・浮体・係留
 – 運動
 – 係留力
・内部空気状態
 – 外部圧力との差圧
 – 空気室内温度
 – オリフィスにおける空気流速

水槽試験の波条件には、大きく分けて 2 通り、規則波と不規則波がある。波に対する運

動の応答（RAO：Response Amplitude Operator および位相）を確認するのが主目的の規則波実験では、造波の波周期を変化させるが、波高影響を確認するために必要に応じて波高も変える。また、最大、最小、平均、標準偏差等の統計値の確認が主目的の不規則波実験では、造波の有義波高と有義波周期を変える。

また、一般的に水槽試験では、下記の二つの試験を実施する。

① 自由動揺試験・・・・主要な動揺モードの固有周期と減滅係数を計測
② 波浪中試験・・・・・・波浪中の浮体運動、接合部の荷重、係留力等の応答を計測

試験状態は試験目的に沿って、発電時、故障時、待機時等を想定する。規則波中試験は 10 波以上、不規則波中試験は実機 1 時間相当を計測する。

(3) データ解析

自由動揺試験では、自由動揺の時系列より固有周期および減滅係数を求める。フルードの表現による減滅係数 a 、b の定義式を次式に示す。

$$\Delta\phi = a\phi_m + b\phi_m^2 \qquad (4.2.2)$$

ここで、$\Delta\phi = \phi_n - \phi_{n+1}$ は、減衰曲線の相隣る二つの振幅 ϕ_n 、ϕ_{n+1} の差であり、$\phi_m = (\phi_n + \phi_{n+1})/2$ は、減衰曲線の相隣る二つの振幅 ϕ_n 、ϕ_{n+1} の平均である。

規則波中試験では、フーリエ解析により平均値と 1 次振幅を求め、1 次振幅の周波数応答関数を求める。応答関数の位相について、入射波に対して遅れを正とした場合の定義を次式に示す。

入射波　：$\zeta = \zeta a \cdot \sin(\omega t)$ 　(4.2.3)

応答　：$\xi = \xi a \cdot \sin(\omega t - \varepsilon)$ 　(4.2.4)

ここで、ζa ：波振幅、ξa ：応答振幅、ω ：周波数、ε ：位相である。

不規則波中試験では、統計解析およびスペクトラム解析を行い、代表的な統計量（平均値、最大値、最小値、有義振幅、有義周期、標準偏差等）を求める。

参考　振動水柱型の基本メカニズムの定式化

1. 流体力学特性

浮体に流体から働く力を次のように分類する（元良ら、1997)。

①浮力
②浮体動揺に伴うラディエーション流体力
③波強制力（入射波の波強制力と散乱波の波強制力の和）
④粘性流体力

浮体に働く力はその他に、重力、浮体自身の慣性力、波漂流力、風力、潮流力、係留力等があるが、ここでは割愛する。

①浮力

浮力は、水面下の浮体表面の静水圧の合力である。浮体が運動する場合、浮力の働く方向は鉛直上向きとは限らない。

静水中の浮体では、鉛直上向きに働く浮力と鉛直下向きに働く重力の合力が、上下揺の復原力である。また、傾斜した浮体では、重力と浮力から生じた偶力が、横揺および縦揺の復原力である。

横揺および縦揺の復原力は、微小傾斜の場合には、線形化して変位に比例する成分だけ取り上げるが、大傾斜の場合には非線形性を考慮する必要がある。

②浮体動揺に伴うラディエーション流体力

運動する浮体の水面下の表面には、浮力を生ずる静水圧の他に変動する流体圧力が働く。この変動する流体圧力に基づく動的流体力をラディエーション流体力と呼ぶ。浮体が運動するとき、周りの流体から反作用として受けるラディエーション流体力は、通常浮体運動の加速度に比例する成分と、速度に比例する成分に分解される。加速度に比例する成分は、付加質量力（付加慣性力）と呼ばれ、速度に比例する成分は、造波減衰力と呼ばれる。

③波強制力

波浪中の浮体表面には、浮体が存在しない場合の入射波中の圧力と、入射波が浮体により散乱させられるために生じる散乱波中の圧力の 2 種類の圧力が作用する。浮体による攪乱を受けないとした入射波中の変動圧力に基づく波強制力をフルード・クリロフ力と呼び、散乱波中の変動圧力に基づく波強制力をディフラクション力という。

④粘性流体力

浮体が運動する際には、流体の粘性に基づく摩擦力が浮体に働く。粘性減衰力は水粒子との相対速度の 2 式で表される非線形項であるが、通常等価線形化される。

2.　熱力波動法と等価浮体近似法

熱力波動法では、固定式振動水柱型装置による波パワーから電力までの変換は、以下に示す空気室の空気の質量保存式とエネルギー保存式、空気室開口部における波の連続式、そしてタービン・発電機の運動方程式によって表す。

$$\frac{dp^*}{dt}=\gamma\frac{p^*+p_0}{D_0-\eta}\left\{\frac{d\eta}{dt}-c_{dt}\varepsilon_t w_p-c_{dv}\varepsilon_v w_{pv}\right\} \qquad (参\text{-}1)$$

$$\frac{dT^*}{dt}=\frac{T^*+T_0}{D_0-\eta}\left\{-\frac{d\eta}{dt}+\frac{D_0-\eta}{p^*+p_0}\frac{dp^*}{dt}+c_{dt}\varepsilon_t w_p+c_{dv}\varepsilon_v w_{pv}\right\} \qquad (参\text{-}2)$$

$$2\eta_I=\frac{1}{\rho_w g}f(kh,kd_c)p^*+\frac{kB}{\tan kB}\eta+\frac{kB}{\sigma}\frac{d\eta}{dt}\frac{1}{\cos\theta_{Mt}} \qquad (参\text{-}3)$$

$$I_{tg}\frac{d\omega}{dt}=T_{qt}-T_{qg}-T_{ql} \qquad (参\text{-}4)$$

ここで、主たる未知変数は以下である。

η ： 空気室の水位の変動成分
p^* ： 空気室の空気圧の変動成分
T^* ： 空気室の温度の変動成分
ω ： タービン・発電機の回転速度（角速度）

以上の式は、数値的に時間ステップごとに解くことができる。ただし、入射波、空気室、タービン・発電機の諸元や特性が与えられていなければならない。詳細は参考資料「高橋重雄，安達崇．固定式振動水柱型波力発電システムの設計と実験的検証」を参照のこと。

また、等価浮体近似法では、空気室内の水塊を等価な浮体として扱う。その最も初期の方法では、空気室内の波パワーから空気パワーへの変換を次式の等価浮体の運動方程式で計算している。

$$(m+m_2^e)\ddot{X}_2+(d_2+N_2^e)\dot{X}_2+(k_2+\rho g A_w)X_2=\rho_w g a_I e_2 e^{i\omega t} \qquad (参\text{-}5)$$

ここで、

m ： 等価な浮体の質量
m_2^e ： 付加質量
X_2 ： 浮体の鉛直変位（熱力波動法のηに相当）
d_2 ： 負荷減衰（ノズル等による負荷減衰）
N_2^e ： 浮体の造波減衰
k_2 ： 負荷バネ（空気室内の空気圧に相当）
a_I ： 入射波高
e_2 ： 波強制力

式（参-5）は規則波に対するものであるが、木下らは熱力波動法のように不規則波に適用で

きるように拡張している。また、空気の圧縮性についても考慮できるように拡張し、基本的には熱力波動法の式（参-1）と式（参-2）に相当する空気の保存式を用いている（木下ら、1986)。すなわち、拡張した等価浮体近似法と熱力波動法の違いは、式（参-5）の等価浮体の運動方程式を用いるか、式（参-3）の波の連続式を用いるかの違いに過ぎない。その計算結果も、設計に用いるような条件では、比較的似ている。

しかしながら、等価浮体近似法の基本的な考え方は、式（参-5）で示されるシステムの線形性であり、負荷減衰も線形なものを基本としている。タービン・発電機を含めたシステムの設計法もその考え方に基づいている。一方、熱力波動法のシステム設計法は、非線形の負荷である空気ノズルを介したものとなっており、大きな違いがある。

なお、空気の圧縮性に関して、模型の縮尺を 1/N とした場合に、実機での空気の圧縮性影響が模型に対して N 倍となる（木下ら、1985)。

3.　境界要素法

図 参-1 に示すように、水面に浮かべた BBDB に右方から波が入射する 2 次元問題を考える（永田ら、2011)。BBDB は線形バネで係留されているものとする。流体は、非粘性、非圧縮の完全流体の無渦運動とすれば、速度ポテンシャルが存在する。波浪中で、浮体はサージ、ヒーブ、ピッチの 3 モード運動をする。

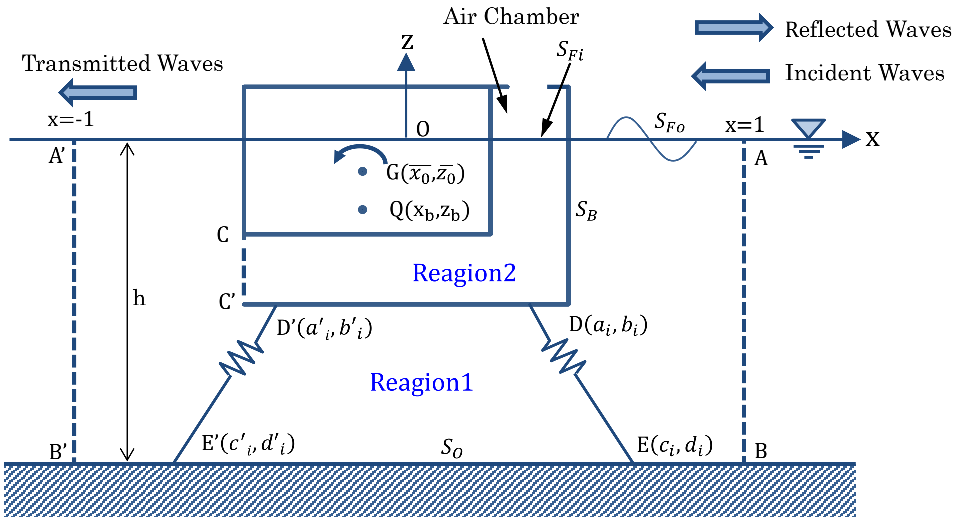


図 参-1　BBDB の模式図

浮体の 3 モード運動と空気室内圧力、速度ポテンシャルを以下のように表す。

$$\xi(t) = x_0 - \bar{x}_0 = \mathrm{Re}\left[X \cdot e^{i\sigma t}\right] \qquad (参\text{-}6)$$

$$\eta(t) = z_0 - \bar{z}_0 = \mathrm{Re}\left[Z \cdot e^{i\sigma t}\right] \qquad (参\text{-}7)$$

$$\delta(t) = \mathrm{Re}\left[\Theta \cdot e^{i\sigma t}\right] \qquad (参\text{-}8)$$

$$p_a(t) - p_0 = \rho g \zeta_0 \mathrm{Re}\left[p_s^a \cdot e^{i\sigma t} \right]$$ （参-9）

$$\Phi(x,z;t) = \frac{g\zeta_0}{\sigma} \mathrm{Re}\left[\phi(x,z) \cdot e^{i\sigma t} \right]$$ （参-10）

ここで、

$\xi(t)$ ： 浮体の水平運動変位
X ： 浮体の水平運動の複素振幅
$\eta(t)$ ： 浮体の鉛直運動変位
Z ： 浮体の鉛直運動の複素振幅
$\delta(t)$ ： 浮体の回転運動変位
Θ ： 浮体の回転運動の複素振幅
$p_a(t)$ ： 空気室内の圧力
p_0 ： 大気圧
ρ ： 水の密度
g ： 重力加速度
ζ_0 ： 入射波振幅
p_s^a ： 空気室内圧力の無次元複素振幅
$\Phi(x,z;t)$ ： 速度ポテンシャル
$\phi(x,z)$ ： 速度ポテンシャルの無次元複素振幅
σ ： 入射波の角周波数
i ： 虚数単位
t ： 時間

流体領域を BBDB の内部と外部に分割する。BBDB 外部の流体領域を領域 1、内部の流体の領域を領域 2 とし、領域 1 における流体に関する支配方程式と境界値問題、領域 2 における流体に関する境界値問題、仮想境界 CC' での領域 1 と領域 2 の接続条件を求める。

境界値問題に境界要素法を適用し、一定要素で離散化された境界積分方程式を求める。

空気室内の空気については、圧縮性流体と考え、空気室内の圧力変化、体積変化、温度変化を以下のように表す。

$$p_a - p_0 = \rho g \zeta_0 \mathrm{Re}\left[p_s^a e^{i\sigma t} \right]$$ （参-11）

$$V_a(t) - V_0 = \mathrm{Re}\left[v_s e^{i\sigma t} \right]$$ （参-12）

$$T_a(t) - T_0 = \mathrm{Re}\left[T_s e^{i\sigma t} \right]$$ （参-13）

上記の式を、空気室内空気の状態方程式、質量保存則、エネルギー保存式に代入して、非線形項を線形化すると、空気室内の式は最終的には次のように表される。

$$\sum_{j=1}^{N_1^{(2)}}\left(1-i\frac{\mu}{\sigma}\right)\phi_1^{(2)}(j)\cdot\Delta x_j-\frac{(1+iC_E)l_c}{C_E}p_s^a-il_c\frac{Z}{\zeta_0}-il_c(x_{0r}-\bar{x}_0)\frac{\Theta h}{\zeta_0}=0 \quad （参-14）$$

次に浮体の運動方程式は以下のようになる。

$$M\frac{d^2(Xe^{i\sigma t})}{dt^2}=P_X^{(w)}+F_X+P_X^{(a)} \quad （参-15）$$

$$M\frac{d^2(Ze^{i\sigma t})}{dt^2}=P_Z^{(w)}+P_Z^{(s)}+F_Z+P_Z^{(a)} \quad （参-16）$$

$$I\frac{d^2(\Theta e^{i\sigma t})}{dt^2}=T_\Theta^{(w)}+T_\Theta^{(s)}+M_\Theta+T_\Theta^{(a)} \quad （参-17）$$

上から順に水平方向、鉛直方向、回転方向に関する運動方程式である。
ここで、

M ：浮体質量と付加質量の和
I ：浮体の慣性モーメントと付加慣性モーメントの和
$P_X^{(w)},P_Z^{(w)},T_\Theta^{(w)}$ ：水による流体力
$P_Z^{(s)},T_\Theta^{(s)}$ ：静的復元力
F_X,F_Z,M_Θ ：係留力
$P_X^{(a)},P_Z^{(a)},T_\Theta^{(a)}$ ：空気室内の空気圧が空気室壁に及ぼす力

以上の水に関する境界積分方程式、浮体の運動方程式、および空気室内空気の方程式に関する積分方程式を解くことによって、流体境界上の速度ポテンシャルと浮体の運動、空気室内の圧力を求めることができる。

また、一次変換効率 η は次のように与えられる。

$$\eta=\frac{E_{air}}{E_i}=2\left(\frac{\rho\sigma\beta_1}{B}\right)\cdot f(kh)\cdot\mathrm{Re}\left[p_s^a\cdot p_s^{a*}\right] \quad （参-18）$$

ここで、

E_{air} ：空気の持つエネルギー
E_i ：入射波のエネルギー
p_s^{a*} ：p_s^a の共役複素数
B ：浮体幅

詳細は参考資料「永田修一，豊田和隆，今井康貴，瀬戸口俊明，中川寛之．浮体式振動水柱型波力発電装置「後ろ曲げダクトブイ」の一次変換効率解析法に関する研究」を参照のこと。

4.　マルチレゾナンス

波浪は様々な振動周期を持ち、かつ短期的、長期的に変動するため、常時高いエネルギー変換効率を得るためには、空気室内水柱の固有振動周期を強制的に変化させるか、または波力装置本体が多数の共振点を有するマルチレゾナンス型の構造にする必要がある。堀田らは、図 参-2 に示すように、空気室前方の左右に Projecting wall を取り付け、マルチレゾナンスの実現の可能性を示した（堀田等、1984）。図 参-3 にマルチレゾナンスによるエネルギー一次変換効率改善の予想を示す。

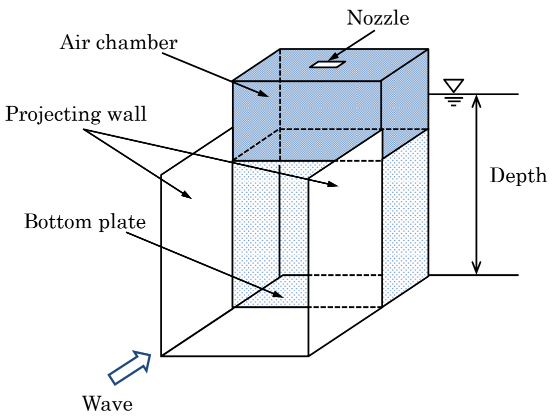


図 参-2　Projecting wall 概要
（出典：堀田平等、1984 による図を参考に作成）

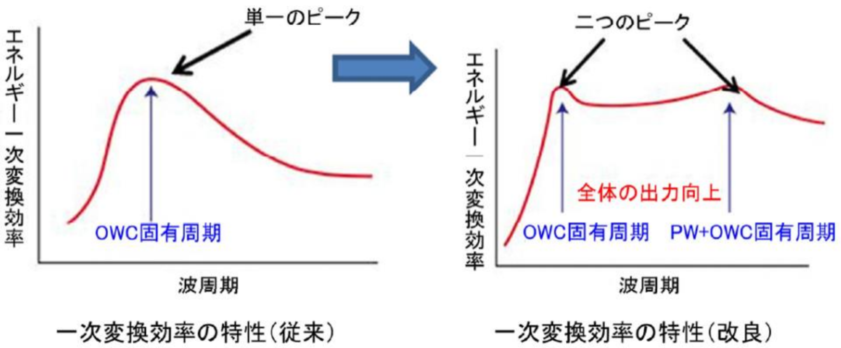


図 参-3　マルチレゾナンスによるエネルギー一次変換効率改善の予想
（出典：木原一禎等、2012）

この概念を発展させ、既設ケーソンに安価に取り付けられるプロジェクティングウォール付ユニット型多重共振型波力発電装置の開発が行われている。しかしながら、横軸に波周期、縦軸にエネルギー一次変換効率をとった場合に、マルチレゾナンスとしての二つのピークは実現したが、現実にはそれらのピークの間に大きな谷ができてしまい、トータルとしてのエネルギー一次変換効率の大幅改善には至らないという課題をクリアできなかったため、実用化には至っていない。

5.　Maxwell モデル

実機のタービンによる空気抵抗はダンパーとしてモデル化でき、固定式の振動水柱型波力

発電装置の簡易的な力学モデルは、図 参-4 のようになる。

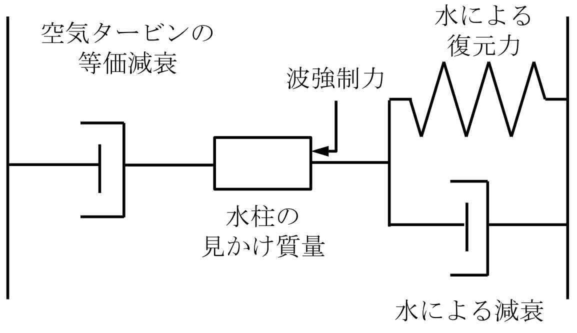


図 参-4　固定式振動水柱型波力発電装置の一般的な力学モデル

慣性力として考慮する質量は、水柱の質量および付加質量を合わせた見かけ質量m_1である。水柱には、水による減衰力（減衰係数c_1）、水による復元力（バネ定数k_1）、波強制力u_1、および空気タービンの減衰力（減衰係数c_2）が働く。

運動方程式は次式となる。

$$m_1\ddot{x}_1 = -k_1x_1 - (c_1 + c_2)\ddot{x}_1 + u_1 \qquad \text{（参-19）}$$

これは、減衰のある場合の強制振動の方程式であり、この系から最大パワーを取り出すには、パラメータを変化させて、いかに共振させるかという問題に帰着する。

ここで、もう少し厳密に対象を見てみる。図 4.2.7 の赤枠で囲った部分に注目すると、図 参-5 のように、空気の圧縮性は空気バネとして、前述のように、実機のタービンによる空気抵抗はダンパーとしてモデル化できる。

空気室内で水柱が上昇して留まったと仮定しよう。十分な時間が経過した場合、もしバネとダンパーが並列であれば、減衰力は 0 となり一定の復元力が働く。しかし、実際にそのようなことが起こった場合には、タービンから空気室外へ空気が抜けていくので、十分な時間が経過した後は減衰力も復元力も働かない。これは、バネとダンパーを直列に並べると説明がつく。バネとダンパーが直列の場合には、水柱がある変位で停止した場合には、十分な時間が経過した後にはダンパーが変位を吸収して、減衰力も復元力も働かない。このように、バネとダンパーが直列に並んでいるモデルを Maxwell モデルといい、浮体式振動水柱型波力発電装置の浮体と水柱をつなぐ空気室と空気タービンは、Maxwell モデルとして取り扱うことができる。

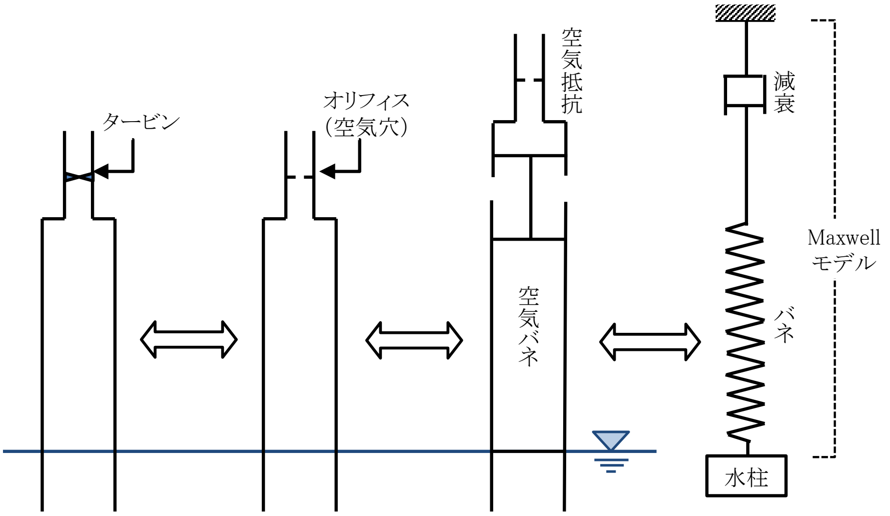


図 参-5　空気室モデル

したがって、浮体式の振動水柱型波力発電装置の一般的な力学モデルは、図 参-6 のようになる。

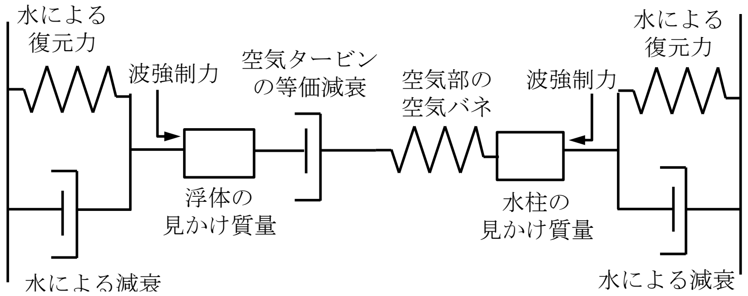


図 参-6　浮体式の振動水柱型波力発電装置のバネ質点系モデル

慣性力として考慮する質量には、浮体の質量および付加質量を合わせた見かけ質量m_2の他に、水柱の質量および付加質量を合わせた見かけ質量m_1が存在する。浮体および水柱にはそれぞれ、水による減衰力（減衰係数c_1, c_3）、水による復元力（バネ定数k_1, k_3）、波強制力u_1, u_2、空気タービンの減衰力（減衰係数c_2）、および空気室の空気バネによる力（バネ定数k_2）が働く。

浮体の見かけ質量と水柱の見かけ質量の間が Maxwell モデルとなる。力の釣り合いから、次の方程式を得る。

$$m_1\ddot{x}_1 = -k_1x_1 - c_1\dot{x}_1 - k_2(x_1 - x_2) + u_1 \qquad (参\text{-}20)$$

$$k_2(x_1 - x_2) = c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) \qquad (参\text{-}21)$$

$$m_2\ddot{x}_3 = c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) - k_3x_3 - c_3\dot{x}_3 + u_2 \qquad (参\text{-}22)$$

式（参-20）、式（参-21）を式（参-19）と比べると、右辺に$c_2\dot{x}_3$という項が付加されており、問題が、単に水柱を共振させるのではなく、浮体と水柱の相対運動を最大化させることに変化していることがわかる。

なお、固定式の場合には、次の方程式になる。

$$m_1\ddot{x}_1 = -k_1x_1 - c_1\dot{x}_1 - k_2(x_1 - x_2) + u_1 \quad \text{（参-23）}$$

$$k_2(x_1 - x_2) = c_2\dot{x}_2 \quad \text{（参-24）}$$

式（参-19）のような単なる共振問題ではない点に注意されたい。

6.　空気室およびタービンのモデル化

(1)　空気室

空気室の相似則の考え方を、図 参-7 に示す。

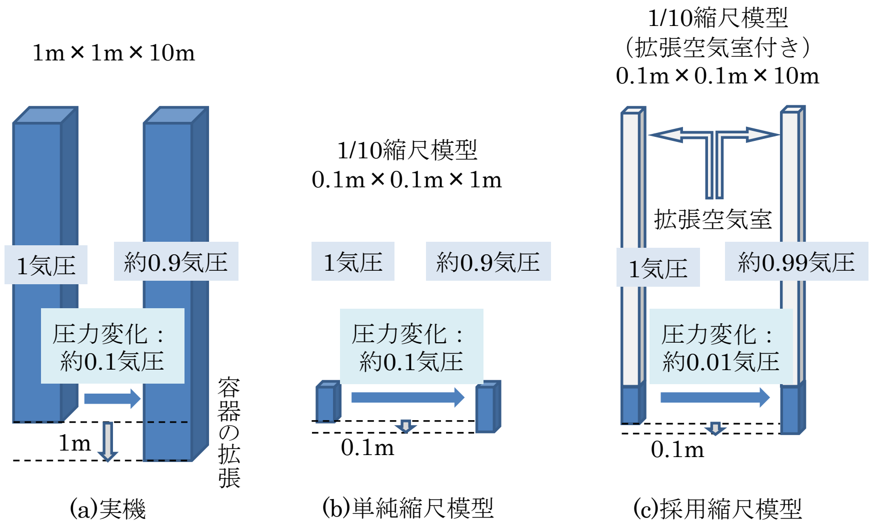
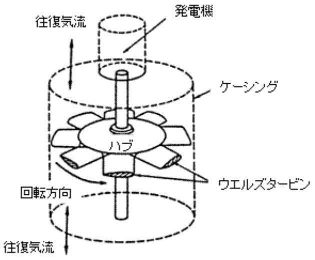


図 参-7　空気室の相似則の考え方

実機を(a)とする。相似則は、実機と模型で慣性力と重力の比を合わせるフルード則を採用する。縮尺をλ＝1/10 とすると、（模型の圧力変化）＝λ×（実機の圧力変化）とならなければいけないが、単純に大きさを 1/10 にした(b)では、実機でも模型でも大気圧は等しいために、（模型の圧力変化）＝（実機の圧力変化）となってしまう。そこで、一部相似則を緩和して、(c)のように空気室の高さのみを実機と同じとすれば、（模型の圧力変化）＝λ×（実機の圧力変化）が成り立つ。模型実験において、この追加した空気室を拡張空気室と呼ぶこととする。

(2)　タービンモデルと流出係数

一般にウェルズタービン（図 参-8）および衝動タービン（図 参-9）は、体積流量Q_pと差圧 p の関係が 2 次であるオリフィスで模擬できると言われている。



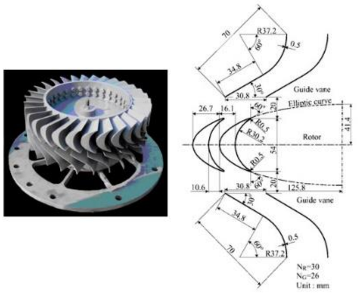


図 参-8　ウェルズタービン　図 参-9　衝動タービン
（出典：一般社団法人 日本機械学会 流体工学部門 ウェブサイト）

ここでは、kを係数として、次のように定義する。

$$p = kQ_p^2 \quad (Q_p > 0 \ : 排気)$$
$$p = -kQ_p^2 \quad (Q_p \leq 0 \ : 吸気) \qquad （参-25）$$

式（参-25）を基に最小自乗法で近似曲線を求め、係数kを求める。求めたkから、タービンをオリフィスで模擬した場合には、流出係数Cは次式となる。

$$C = \sqrt{\frac{8(1-m^2)\rho}{k\pi^2 d^4}} \qquad （参-26）$$

$$m = \frac{S_o}{S_p} \qquad （参-27）$$

ここで、d [m]、ρ [kg/m3]、S_o [m2]、S_p [m2]はそれぞれ、オリフィス直径、空気密度、オリフィス面積、空気室断面積である。

(3)　Maxwell モデルのバネ定数と減衰係数

オリフィス特性試験から Maxwell モデルによる減衰とバネ定数を直接求める方法を以下に示す。ただし、減衰については線形近似を行う。

オリフィス特性試験における Maxwell モデルを図 参-10 の通りとして、振動水柱型波力発電装置内部の水面変位を模擬したピストンの加振変位x_p [m]、オリフィス出口での仮想的な空気の変位をx_0 [m]、その差をγ [m]とすると、

$$\gamma = x_o - x_p \qquad （参-28）$$

ピストンの周期をτ [s]、角周波数$\omega = 2\pi/\tau$ [rad/s]、γ の振幅をγ_0 [m]、時間をt [s]として、

$$\gamma(t) = \gamma_0 \cos\omega t \qquad （参-29）$$

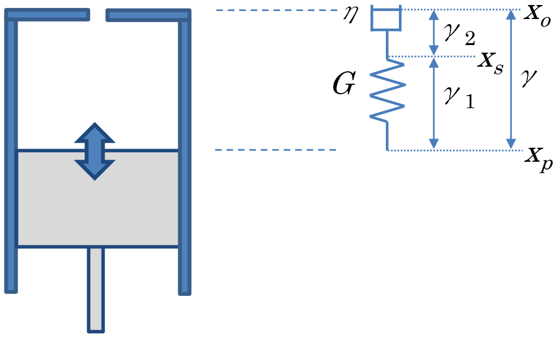


図 参-10　Maxwell モデル

シリンダーの底面積を

$$S_s = S_p - S_o \qquad (参\text{-}30)$$

とする。シリンダー底面にかかる力 F_s [N]を、

$$F_s(t) = pS_s = A\cos\omega t + B\sin\omega t \qquad (参\text{-}31)$$

とした場合、フーリエ係数 A [N]、 B [N]を

$$A = \frac{2}{\tau}\int_{-\frac{\tau}{2}}^{\frac{\tau}{2}} F_s(t)\cos\omega t dt \qquad (参\text{-}32)$$

$$B = \frac{2}{\tau}\int_{-\frac{\tau}{2}}^{\frac{\tau}{2}} F_s(t)\sin\omega t dt \qquad (参\text{-}33)$$

より求めれば、バネ定数 G [N/m]および減衰係数 η [Ns/m]はそれぞれ、

$$G = \frac{1}{\gamma_0}\frac{A^2 + B^2}{A} \qquad (参\text{-}34)$$

$$\eta = -\frac{1}{\omega\gamma_0}\frac{A^2 + B^2}{B} \qquad (参\text{-}35)$$

で求められる。

4.3 可動物体型

4.3.1 波エネルギー吸収の基本メカニズム

可動物体型の波力発電装置は、波浪強制力によって水面上あるいは水中で動揺する可動物体を持ち、可動物体の動揺を発電機構で電気エネルギーに変換する。可動部の運動モードにより、並進動揺型と屈曲動揺型に大別される。図 4.3.1 に両形式の代表的な例を示す。

この例のように、並進動揺型は鉛直軸に対して対称な形状の可動物体を持ち、あらゆる方向から到来する波エネルギーを吸収できる形式が一般的である。一方、屈曲動揺型は屈曲方向と波向を一致させるように配置する必要がある。

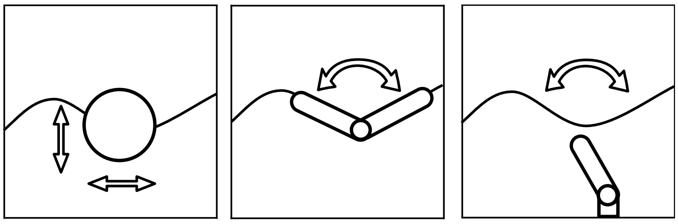


図 4.3.1　代表的な可動物体型波力発電装置の分類
（出典：EMEC ウェブサイトの図を参考に作成）

(1) 流体力学特性

波力発電装置およびその構成要素に働く流体力は、船舶や海洋構造物と同じく、ポテンシャル理論に基づき評価する場合、またはモリソン式により評価する場合の 2 通りが考えられる。波力発電装置や構成要素の代表長さが波長に比べて十分に大きければ、ポテンシャル理論に基づき流体力を評価する。一方、それらの代表長さが波長に比べて小さく、流れの剥離による抗力成分が無視できない状況であれば、モリソン式に基づき流体力を評価する。一例として、円柱に作用する流体力のうち、どのようなものが支配的となるかを円柱の直径と波長の比で整理した結果を図 4.3.2 に示す。図 4.3.2 中の D/λ 、KC 、H/λ は、それぞれ直径波長比、クーリガン・カーペンター数（KC 数：Keulegan-Carpenter number）、波傾斜である。およそ、$D/\lambda \geqq 0.2$ の領域では、波長に比べて円柱の直径が相対的に大きくなり、ポテンシャル理論で求められるディフラクション流体力を主として考慮すべきである。流体力をモリソン式で与える場合の目安として、$D/\lambda < 0.2$ 、$KC > 2.2$ という条件がある。

ポテンシャル理論に基づく流体力の考え方、モリソン式に基づく流体力の考え方を本章末の参考-1 に記述する。

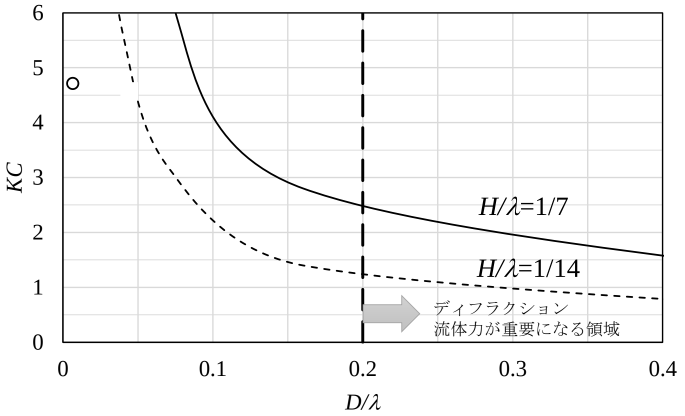


図 4.3.2　流体力領域図
（出典：吉田宏一郎、2010）

(2) 制御理論

図 4.3.3 に示した上下方向にのみ運動する波力発電装置を例に、波から得られるエネルギー吸収量を最大化するための制御について考える。ここで、図中の発電機構は、浮体が波エネルギーを最も効率良く吸収できるように、浮体の運動速度と位相を制御できるものと仮定する。また、入射波は規則波を仮定する。

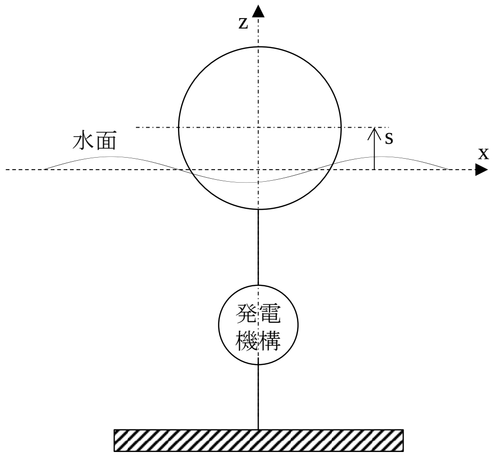


図 4.3.3　上下方向にのみ運動する波力発電装置
（出典：Jørgen Hals et al.、2011 の図を参考に作成）

浮体に波が入射すると、浮体には波浪強制力（F_{e3}：フルード・クリロフ力とディフラクション力の和）が作用し、浮体の動揺によってラディエーション流体力F_{r3}が作用する。浮体に作用する力F_{t3}は式（4.3.1）と表す。なお、式（4.3.1）中の$\hat{F}_{t3},\hat{F}_{e3},\hat{F}_{r3}$は、それぞれ、浮体に作用する力、波浪強制力、ラディエーション流体力の複素振幅を意味している。以降、変数にハット「^」を付加した場合は複素振幅とする。なお、発電機構による制御力や波力発電装置の機械摩擦力等は、全てF_{t3}に含まれているものとする。

$$\hat{F}_{t3} = \hat{F}_{e3} + \hat{F}_{r3} \quad (4.3.1)$$

ここで、電気回路との類推から得られるインピーダンス（impedance、出力の複素振幅と定常振動の速度の複素振幅の比）の考え方をラディエーション流体力に対して導入する。すなわち、ラディエーションインピーダンス$Z_{33}(\omega)$を用いて、上下方向の運動速度u_3を入力とした時のラディエーション流体力を式(4.3.2)のように記述する。式(4.3.2)中の$Z_{33}(\omega)$は複素数であり、式（4.3.3）のように実部と虚部に分けて表示すると、実部は造波減衰力係数R_{33}となり、虚部には付加質量係数m_{33}があらわれる。式（4.3.2）を式（4.3.1）に代入すると、浮体に作用する力は式（4.3.4）となる。

$$\hat{F}_{r3} = -Z_{33}(\omega)\hat{u}_3 \tag{4.3.2}$$

$$Z_{33}(\omega) = R_{33}(\omega) + iX_{33} = R_{33}(\omega) + i\omega m_{33}(\omega) \tag{4.3.3}$$

$$\hat{F}_{t3} = \hat{F}_{e3} - Z_{33}\hat{u}_3 \tag{4.3.4}$$

式（4.3.4）の両辺に$1/2\hat{u}_3^*$を掛け、その実部をとれば浮体が吸収する波パワー（以降、吸収パワーと呼ぶ）の時間平均値が式（4.3.5）で得られる。なお、式（4.3.5）中の$\hat{u}_3^*$は、$\hat{u}_3$の複素共役である。また、P_e、P_rは、それぞれ波浪強制力パワーの時間平均値、ラディエーション流体力パワーの時間平均値を示している。

$$P = \frac{1}{2}\mathrm{Re}\left[\hat{F}_{t3}\hat{u}_3^*\right] = P_e - P_r \tag{4.3.5}$$

P_e、P_rは、以下のように与えられる。

$$P_e = \frac{1}{2}\mathrm{Re}\left[\hat{F}_{e3}\hat{u}_3^*\right] = \frac{1}{4}\left(\hat{F}_{e3}\hat{u}_3^* + \hat{F}_{e3}^*\hat{u}_3\right) \tag{4.3.6}$$

$$P_r = \frac{1}{2}\mathrm{Re}[Z_{33}\hat{u}_3\hat{u}_3^*] = \frac{1}{2}R_{33}|\hat{u}_3|^2 \tag{4.3.7}$$

式（4.3.6）について、運動速度と波浪強制力の位相差をγ_3とすれば、位相差を用いて式（4.3.8）と書き直せる。

$$P_e = \frac{1}{2}\left|\hat{F}_{e3}\right||\hat{u}_3|\cos(\gamma_3) \tag{4.3.8}$$

式（4.3.8）の波浪強制力のパワーは、運動速度の絶対値に対して 1 次関数であり、ラディエーション流体力のパワーは 2 次関数であるから、吸収パワーと運動速度の絶対値との関係を模式的に表すと図 4.3.4 の放物線となる。この図から、波浪場から波浪強制力を介して波力発電装置に供給されたエネルギーの一部は、ラディエーション流体力のパワーとして波浪場に戻っていくことが分かる。

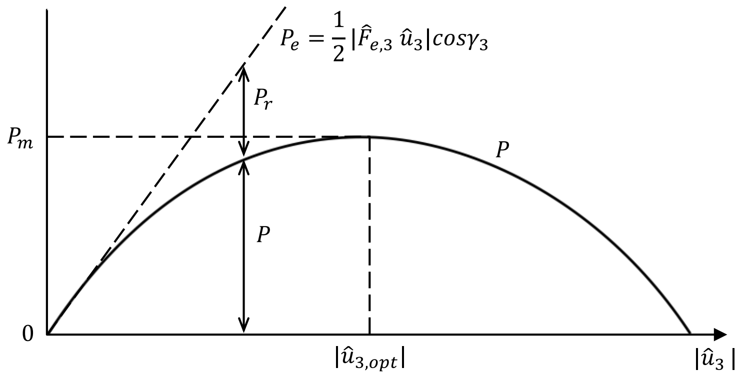


図 4.3.4　吸収パワーと運動速度の絶対値の関係

発電機構については、浮体が波エネルギーを最も効率良く吸収できるように、浮体の運動速度と位相を制御できるものと仮定していた。式（4.3.5）に式（4.3.6）と式（4.3.7）を代入して整理すれば、吸収パワーPが極大化する為に発電機構が実現すべき運動速度の絶対値$|u_3|_{opt}$の条件は、式（4.3.9）で与えられる。式（4.3.9）を式（4.3.5）に代入すると吸収パワーP_{max}は式（4.3.10）となる。また、式（4.3.9）を式（4.3.7）および式（4.3.8）に代入すれば、この条件で、吸収パワー、ラディエーション流体力パワー、波浪強制力パワーには式（4.3.11）の関係が成り立つことが分かる。

$$|\hat{u}_3|_{opt} = \frac{|\hat{F}_{e3}|}{2R_{33}}\cos(\gamma_3) \tag{4.3.9}$$

$$P_{max} = \frac{|\hat{F}_{e3}|^2}{8R_{33}}\cos^2(\gamma_3) \tag{4.3.10}$$

$$P_{max} = (P_{r3})_{opt} = \frac{1}{2}(P_{e3})_{opt} \tag{4.3.11}$$

さらに、式（4.3.10）は、運動速度と波浪強制力の位相差γ_3を含んでいるので発電機構によって位相差を 0、すなわち上下揺れの同調状態に制御すれば、最大吸収パワーP_{MAX}が得られる。この時、式（4.3.9）および式（4.3.11）は、それぞれ式（4.3.13）、式（4.3.14）となる。

$$P_{MAX} = \frac{|\hat{F}_{e3}|^2}{8R_{33}} \tag{4.3.12}$$

$$|\hat{u}_3|_{OPT} = \frac{|\hat{F}_{e3}|}{2R_{33}} \tag{4.3.13}$$

$$P_{MAX} = (P_{r3})_{OPT} = \frac{1}{2}(P_{e3})_{OPT} \tag{4.3.14}$$

波力発電装置の機械摩擦力による損失も含めた最大吸収パワーの考え方、および波エネルギー吸収を最大化するための制御については章末の参考-2 に記述する。

4.3.2 数値計算技術

可動物体型波力発電装置は、発電機構と接続された可動物体を波の中で運動させて発電を行う。数値シミュレーションは水槽試験と同じく、発電性能および安全性に関する性能の検証を目的としている。その為、数値シミュレーションにおいては、可動物体の流体力学特性だけでなく、発電機構の機械的特性も適切にモデル化する必要がある。また、可動物体、発電機構およびその他波力発電装置に含まれる構造体を統合した数値シミュレーションが必須であり、機構解析を実施可能であることが、数値シミュレーションツールに求められる。表 4.3.1 に可動物体型波力発電装置に適用可能な数値シミュレーションツールをまとめる。

可動物体型波力発電装置に関する数値シミュレーションは、既往の汎用数値シミュレーションツールを組み合わせて実施されたり、船舶海洋工学の分野で利用される数値シミュレーションツールを援用して実施されてきた。近年では、波力発電装置に特化した数値シミュレーションツールの開発も進んでいる。ここでは、波力発電装置に特化した数値シミュレーションツールの中で、可動物体型波力発電装置に適用可能な数値シミュレーションツールの一部を紹介する。各シミュレーションツールの詳細な説明および利用法等は参考資料に記載した出典元を参照のこと。

表 4.3.1　可動物体型波力発電装置に適用可能な数値シミュレーションツール

名称	開発者	開発国	シミュレーション		モデリング
			Time / Frequency domain	統合化	単体/多体
Wave Dyn	DNV GL AS	ドイツ	Time domain	M.B.D ソルバ	単体/多体（10 機程度）
WEC-Sim	Sandia-NREL	米国	Time domain	MATLAB Simulink	単体
WaveFarmer	DNV GL AS	ドイツ	Time domain	—	アレイ専用
SNL-SWAN	Sandia National Laboratory	米国	Time domain	—	アレイ専用

4.3.3 水槽実験技術

可動物体型の波力発電装置は、他の波力発電装置と同じく、新規技術で実証がなされていないものが多い。したがって、波力発電装置の開発は、コンセプトの検証から始まり、構成要素、部分システム（サブシステム）、全体システムのように、初めは小さな要素・部分から徐々に大きな要素・部分に向かって、また、そのサイズも小さなスケールからより大きなスケールを経て、フルスケールに向かって開発が進展する。開発における基本的な評価項目は、発電性能および安全性に関する性能である。この 2 点が十分に評価されていることで、はじ

めて事業化に向けた経済性や環境への影響の検討が現実的となる。

水槽試験およびその結果は、開発の各段階で検討される発電性能および安全性に関する性能に関する項目を確認すると共に、波力発電装置の開発出資者への投資判断材料ともなりうる。参考資料では水槽試験の目的を表 4.3.2 として例示している。また、実海域での実証試験に到達するまでを 5 段階に分けて考え、各段階で典型的な模型縮尺、利用すべき施設、試験期間ならびに試験点数等を例示している。水槽試験は第 1、第 2 段階で実施される。水槽試験の典型的な模型縮尺、利用すべき施設、試験期間ならびに試験点数等を表 4.3.3 に示す。

表 4.3.2　水槽試験の主な目的

	目的
1	発電装置の挙動・動作原理の検証
2	数値モデルの検証と校正
3	技術的性能の定量化
4	係留系や基礎構造物等の設計改善に資する環境外力データの取得
5	流体力学的プロセスとその他の物理的プロセスの特定およびそれらの理解の向上
6	最適性能を引き出す設計に用いる詳細なデータの取得
7	発電機構に関する技術者のための詳細情報の生成
8	発電装置の経済性評価
9	発電装置の凌波性と堪航性の定量化
10	発電装置の極値海象条件下の耐航性の検証※
11	発電装置の環境負荷※

※環境外力が穏やかな海象条件を有する試験場での計測に先行して実施しても良い。

（出典：NEDO、2013 による表を参考に作成）

表 4.3.3　水槽試験内容の例示

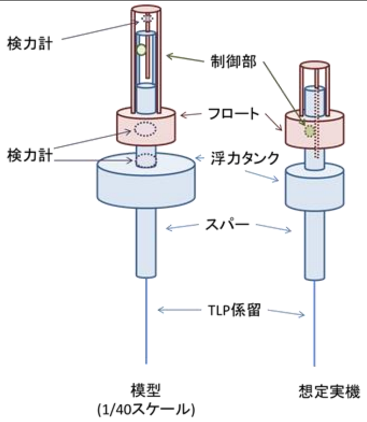
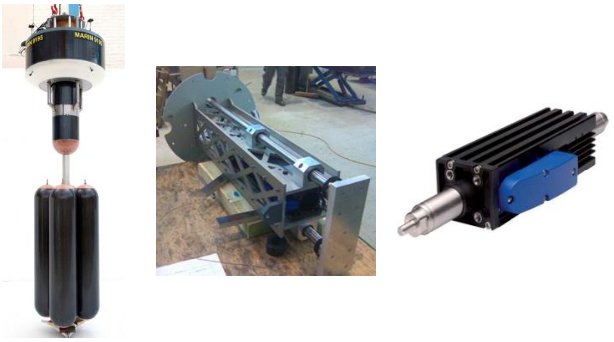
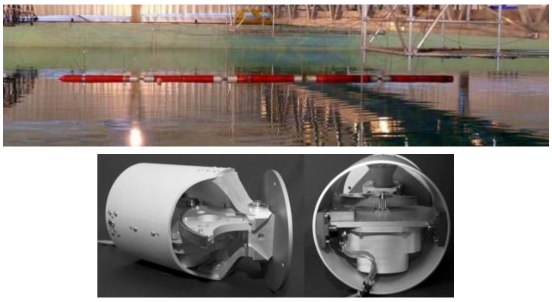
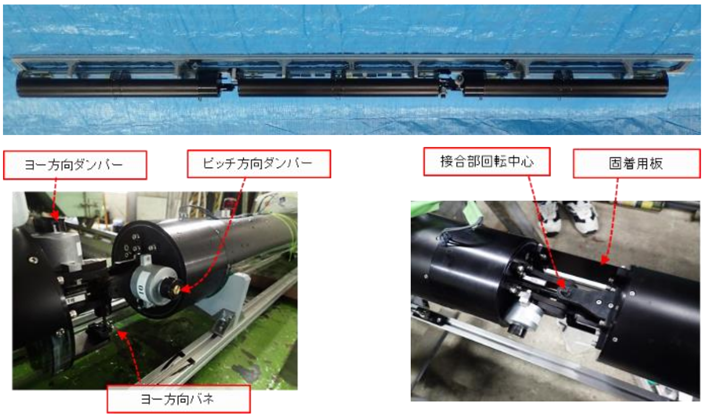
<table>
<tr><th rowspan="2"></th><th colspan="3">第 1 段階</th><th rowspan="2">第 2 段階</th></tr>
<tr><th>コンセプト検証</th><th>性能検証</th><th>最適化</th></tr>
<tr><td>縮尺</td><td colspan="3">1/100～1/25</td><td>1/25～1/10</td></tr>
<tr><td>目的</td><td colspan="2">・動作原理の検証
・発電性能に寄与するパラメータ把握
・波力発電装置に働く流体力特性把握
・発電装置の波浪中応答（RAO）把握
・発電機構模型の特性把握</td><td>・実海域に近い波浪条件での性能把握（含波向）
・発電装置の RAO の把握
・耐航性能の把握
・設置海域に至る航路上での安全性確認</td><td>・第 1 段階の検証
・耐航性能の検証
・係留系破断時の挙動確認</td></tr>
<tr><td>模型</td><td colspan="2">・状態変更可能な設計
・発電機構モデルは減衰力を可変
・標準的な係留系、質量分布を模擬</td><td>実機に近い質量分布を模擬</td><td>実機と同じ係留系配置</td></tr>
<tr><td>計測項目</td><td colspan="4">波力発電装置の運動、波力発電装置および発現機構に働く力、水面変位</td></tr>
<tr><td>施設</td><td colspan="3">2 次元水路、試験水槽</td><td>試験水槽</td></tr>
<tr><td>期間</td><td>1～3 週間</td><td>1～3 ヵ月</td><td>1～3 ヵ月</td><td>6～12 ヵ月</td></tr>
<tr><td>点数</td><td>50～500 点</td><td>250～500 点</td><td>100～250 点</td><td>50～250 点</td></tr>
<tr><td>波条件</td><td>規則波（小波高、周期 10～25 通り程度）
不規則波（5 通り程度）</td><td colspan="2">不規則波（実機で 20 分相当）
数種の海洋波の周波数スペクトル</td><td>設置海域での周波数スペクトル
長波頂および短波頂不規則波</td></tr>
</table>

（出典：EMEC、2009 による表を参考に作成）

(1) 可動物体型波力発電装置の発電機構の模型化

可動物体型波力発電装置を例に、発電機構（PTO：Power Take Off）の模型化に関する先行研究例を紹介する。先行研究では、PTO を復元力機構と減衰力機構の力学的素子として模型化している事例が多い。表 4.3.4 に PTO の模型化例を示す。PTO の模型化は、水槽試験で確認したい項目により程度が異なる。コンセプトの検証や基本的な安全性の確認が目的であれば、ダンパーおよびバネを力学的素子として用いる事例もある。一方、発電性能の確認も行う場合は、制御可能な機器（AC サーボモータ、直動式リニアモータ等）を力学的素子として用いる事例もある。

表 4.3.4　PTO の模型化例

発電模擬方式	模型化の事例	概要
並進動揺 モータ式 トルク制御		定トルクモータとギヤを組み合わせ、可動物体の運動速度に比例する減衰力と変位に比例する復元力を発生させる。
並進動揺 モータ式 推力制御	 （出典：Mackay, Ed et al.、2012）	直動式リニアモータを採用。電流指令値に応じた推力を発生。運動速度に対して線形／非線形な推力を発生させることが可能。
屈曲運動 モータ式 トルク制御	 （出典：Mackay, Ed et al.、2012）	ヒンジ部に 2 台のサーボモータを取り付けトルクを制御。可動物体の角速度に対して線形的／非線形な推力を発生させることが可能。
屈曲運動 ダンパー・バネ式 トルク制御	 （出典：海上・港湾・航空技術研究所海上技術安全研究所提供）	ヒンジ部に 2 台のダンパー、バネ機構を設置。ダンパー、バネ機構は、減衰力係数や復原力係数を数種設定できるように設計。

(2) 可動物体型波力発電装置の水槽試験例（屈曲動揺型）

Pelamis Wave Power 社による Pelamis の開発を例に、コンセプト検証から実海域試験までに実施された水槽試験を表 4.3.5 に紹介する。Pelamis の場合は、初歩的な安全性の確認（1/80 スケール、1998 年 5 月）から始まり、試験目的に応じて徐々にスケールを大きくしていることが分かる。また、必要に応じて、再び小スケールの模型試験を行う等（例えば、1/50 スケール、2002 年 8 月）、水槽試験における検証のループを繰り返していることが分かる。

表 4.3.5　実海域試験までに実施された水槽試験例（Pelamis の場合）

Model	*Test Objective*	*Location*	*Date*
80th Scale	Survivability	University of Edinburgh wide tank	May 1998
35th Scale	Numerical model validation	University of Edinburgh wide tank	July 1998
35th Scale	Alternative configurations	University of Edinburgh wide tank	July 1998
20th Scale	Survivability	London City University 55 *m* wave flume	Sept 1999
20th Scale	Numerical model validation	Glasgow University 77 *m* wave tank	Aug 2000
20th Scale	Power capture and mooring specification	Trondheim Ocean Wave Basin, Norway	Oct 2000
33rd Scale	Power capture	University of Edinburgh wide tank	Jan 2001
33rd Scale	Power capture	University of Edinburgh wide tank	Aug 2001
7th Scale	Digital control systems	Firth of Forth	Oct 2001
33rd Scale	Mooring response	Glasgow University 77 *m* wave tank	Mar 2002
50th Scale	Survivability	Glasgow University 77 *m* wave tank	Aug 2002
20th Scale	Control and survivability	Ecole Centrale de Nantes wide tank	Oct 2002
20th Scale	Control systems	Ecole Centrale de Nantes wide tank	Mar 2003
7th Scale	Mooring response and development	Ecole Centrale de Nantes wide tank	Apr 2003
20th Scale	Control and survivability	Ecole Centrale de Nantes wide tank	Mar 2005
21st Scale	Control and survivability	Ecole Centrale de Nantes wide tank	Feb 2007
21st Scale	Alternative configurations; Numerical model validation	Ecole Centrale de Nantes wide tank	Apr 2007

（出典：Cruz J.、2010）

参考−1　可動物体型の流体力学特性

1. ポテンシャル理論に基づく流体力

流体は非粘性・非圧縮・渦なし流れを仮定すると、速度ポテンシャルを導入することができる。図 参-1.1 のように場を設定する。この図では、一例として船舶の形状を描いているが、対象構造物としては、浮体式の構造物はもとより、海底に固定された構造物の場合も基本的には同一である。

図 参-1.1 に示した流体領域は、浮体の没水表面 S_H、波の存在する自由表面 S_F、無限遠方での放射境界 S_∞、および水底 S_B で囲まれているとする。水深は一定でありその値を h とする。座標系は静止水面上に原点を持つ空間固定座標系 o-xyz であり、z 軸は鉛直上向きを正とする。

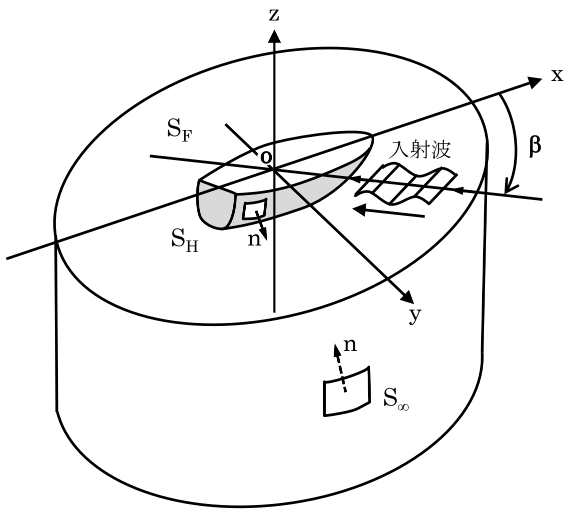


図 参-1.1　流体領域

入射波の速度ポテンシャルは、式（参-1.1）で表すことができる。式（参-1.1）で、ζ_a は波の振幅、K は無限水深での波数、ω は波の円周波数である。また、$\mathrm{Re}[\;]$ は実部をとることを意味している。

$$\Phi_0(x,t)=\mathrm{Re}\left[\frac{g\zeta_a}{i\omega}\exp\{Kz+iK(x\cos\beta+y\sin\beta)+i\omega t\}\right] \qquad (参\text{-}1.1)$$

式（参-1.1）の時間項を分離して表すと式（参-1.2）となる。

$$\Phi_0(x,t)=\mathrm{Re}\left[\frac{g\zeta_a}{i\omega}\phi_0(x)\exp(i\omega t)\right]$$

ただし、

$$\phi_0(x)=\exp\{Kz+iK(x\cos\beta+y\sin\beta)\} \qquad (参\text{-}1.2)$$

式（参-1.2）を入力として考えると、線形境界値問題の解としての速度ポテンシャルは、式（参-1.3）の形となる。式（参-1.3）中の ϕ_7 は、浮体が入射波を散乱させる撹乱ポテンシャルを表す。$\phi_0+\phi_7$ を ϕ_D と表し、ディフラクションポテンシャルと呼ぶ。また、ϕ_j（j＝1~6）は、浮体の j モードの動揺（j＝1 : surge, j＝2 : sway, j＝3 : heave, j＝4 : roll, j=5 : pitch, j=6 : yaw）によるラディエーションポテンシャルである。X_j は、j モードの動揺を $\mathrm{Re}[X_j \exp(i\omega t)]$ と表した時の複素振幅であり、X_j は運動方程式の解となっている。

$$\Phi(x,t)=\mathrm{Re}\left[\phi(x)\exp(i\omega t)\right] \quad \text{（参-1.3）}$$

ただし、

$$\phi(x)=\frac{g\zeta_a}{i\omega}\left\{\phi_0(x)+\phi_7(x)\right\}+\sum_{j=1}^{6} i\omega X_j\phi_j(x)$$

速度ポテンシャル ϕ_j（j＝1~6）および ϕ_7 が満足すべき周波数領域での条件式は、式（参-1.4）で表される。式（参-1.4）中の[L]は質量保存則から得られる連続の方程式、[F]は自由表面条件、[B]は水底条件、[H]は物体（船体）表面条件、[R]は無限遠方の境界 S における波の放射条件である。これらの周波数領域での線形境界値問題を解く方法として、境界要素法、多重極展開法、領域分割法が知られており、これらを以下に概説する。

$$\begin{aligned}
&[\mathrm{L}] \quad \nabla^2\phi_j=0 \quad \text{for} \quad z\ge 0\\
&[\mathrm{F}] \quad \frac{\partial\phi_j}{\partial z}-K\phi_j=0 \quad \text{for} \quad z=0\\
&[\mathrm{B}] \quad \frac{\partial\phi_j}{\partial z}=0 \quad \text{for} \quad z=-h\\
&[\mathrm{H}] \quad \frac{\partial\phi_j}{\partial n}=n_j, \quad \frac{\partial(\phi_0+\phi_7)}{\partial n}=0 \quad \text{on} \quad S_H\\
&[\mathrm{R}] \quad \phi_j=\frac{1}{\sqrt{R}}\exp(-ik_0R) \quad \text{as} \quad R=\sqrt{x^2+y^2}\to\infty
\end{aligned} \quad \text{（参-1.4）}$$

① 境界要素法

物体表面を多数の要素に分割し、そこに湧き出しに基づくグリーン関数（Green function）を利用して解く方法である。2 次元、3 次元物体の両方に適用できる手法である。物体の浸水表面の分割要素毎に強さが周期的に変化する湧き出しが存在するとし、その強さを境界条件を満たしながら解くことで速度ポテンシャルを求める方法を特異点分布法という。

② 多重極展開法

速度ポテンシャルを級数で表し、各項の係数を境界条件によって決める方法である。物体断面形状に制約はあるものの計算時間は短い。いわゆる、ルイスフォーム（Lewis Form）断面に対する Ursell-田才法などがある。この方法は、船体運動の解析に用いられているストリップ法の基礎となっている 2 次元ポテンシャル理論である。

③ 領域分割法

自由表面条件と海底条件から定まる固有値に対応する固有関数により速度ポテンシャルを展開する方法であり、浅海域の箱型断面形状の浮体などに有効性を発揮する方法である。固有関数展開法とも呼ばれる。

2. モリソン式に基づく流体力

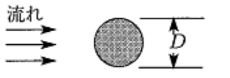
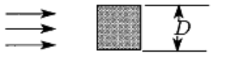
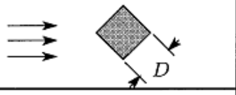
Morison らは、振動流中の流れ方向の流体力に関して、物体から剥離した渦から受ける力が流体速度の 2 乗に比例する成分と、流体加速度に比例する成分に分けられると考え、ポテンシャル理論によって求められる付加質量に基づく力と水平浮力を含めて、円柱に働く単位長さ当たりの流体力が式（参-1.5）で表現できるとした。

$$f_I = C_d \frac{1}{2} \rho D u|u| + C_m \rho \frac{\pi}{4} D^2 \frac{du}{dt} \qquad (参\text{-}1.5)$$

式（参-1.5）で右辺の第 1 項、第 2 項はそれぞれ抗力、質量力と呼ばれる。係数 C_d 、C_m は抗力係数、質量係数と呼ばれる。第 1 項の質量力には、渦から受ける成分に加え、ポテンシャル理論によって求められる付加質量に基づく力と水平浮力が含まれている。

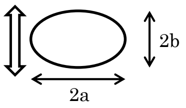
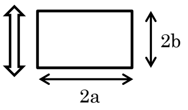
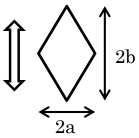
式（参-1.5）を円柱以外の形状に適用する場合は、抗力係数については表 参-1.1 の値が、質量係数については表 参-1.2 の値が一般的に用いられる。これらの流体力係数は、実際には KC 数と Re 数に依存するが、実用的にはどちらの係数も一定値として与えることが多い。

表 参-1.1　柱状物体の抗力係数

断面形状		基準長さ	抗力係数 (l: 柱体長さ)
円柱		D	1.17 ($l > D$)
正角柱		D	2.05 ($l > D$)
正角柱		$\sqrt{2}D$	1.55 ($l > D$)
L形柱		D	2.00 ($l > D$)
I形柱		D	2.10 ($l > D$)
長方形柱		D	2.01 ($l > D$)

（出典：日本造船学会海洋工学委員会性能部会、2003）

表 参-1.2　柱状物体の質量係数

断面形状		基準断面積	質量係数 Cm
	a/b=10 a/b=5 a/b=1 a/b=1/5 a/b=1/10	πa^2	1.10 1.20 2.00 6.00 11.0
	a/b= ∞ a/b=10 a/b=5 a/b=1 a/b=1/5 a/b=1/10	πa^2	1.00 1.27 1.46 2.78 8.35 15.0
	a/b=2 a/b=1 a/b=1/2 a/b=1/5	πa^2	1.05 1.08 1.31 2.20

（出典：土木学会、1972 による表を参考に作成）

参考–2　可動物体型の制御理論（詳細）

4.3.1(2)の制御理論では、機械損失を考慮しない場合の吸収パワーについて記載した。ここでは、波力発電装置の機械摩擦力等が含まれる場合の吸収パワーの考え方を記載する。

式（4.3.5）で定義した吸収パワーPは、浮体に作用する力F_{t3}をパワーに換算して得られた。F_{t3}には、発電機構による制御力や波力発電装置の機械摩擦力等が含まれている。そこで、式（参-2.1）のように発電機構によって電気エネルギーに変換されるパワーP_u（以降、有効パワーと呼ぶ）と機械摩擦等の損失で失われるパワーP_f（以降、損失パワーと呼ぶ）の 2 種類に分離することを考える。

$$P = P_u + P_f \qquad (参\text{-}2.1)$$

ここでは、簡単のため、発電機構で発生する制御力F_{u3}と機械摩擦等の損失となる力F_{f3}は、運動速度に比例する要素としてモデル化できると仮定し、式（参-2.2）および式（参-2.3）と定義する。なお、発電機構は、波エネルギーを最も効率良く吸収できるように、浮体の運動速度と位相を制御できるものと仮定していたので、発電機構の減衰係数R_uは任意の値に設定できるものとする。

$$F_{u3} = -R_u u_3 \qquad (参\text{-}2.2)$$

$$F_{f3} = -R_f u_3 \qquad (参\text{-}2.3)$$

式（参-2.3）を用いると、損失パワーは式（参-2.4）で与えられる。

$$P_f = \frac{1}{2} R_f |\hat{u}_3|^2 \qquad (参\text{-}2.4)$$

また、有効パワーは式（参-2.5）で与えられる。なお、式（4.3.7）および式（4.3.8）を導出の際に用いている。

$$\begin{aligned} P_u &= \frac{1}{2} R_u |\hat{u}_3|^2 = P - P_f = P_e - (P_r + P_f) \\ &= \frac{1}{2} |F_{e3}||\hat{u}_3| \cos(\gamma_3) - \frac{1}{2}(R_{33} + R_f)|\hat{u}_3|^2 \end{aligned} \qquad (参\text{-}2.5)$$

発電機構により、運動速度と波浪強制力の位相差γ_3が 0 に制御されている条件を考えると、P_e、P_r、P、P_f、P_uと運動速度の絶対値の関係は図 参-2.1 となる。また、式（参-2.5）で位相差γ_3を 0 とした場合、最大有効パワーおよびその時の速度の絶対値は、式（参-2.6）および式（参-2.7）で与えられる。

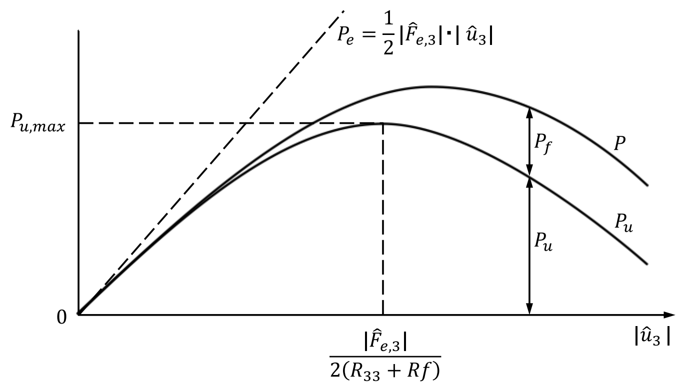


図 参-2.1　パワーと運動速度の絶対値の関係

$$P_{u,MAX} = \frac{|\hat{F}_{e3}|^2}{8(R_{33}+R_f)} \qquad (参\text{-}2.6)$$

$$|\hat{u}_3|_{OPT} = \frac{|\hat{F}_{e3}|}{2(R_{33}+R_f)} \qquad (参\text{-}2.7)$$

ここまで、発電機構は「波エネルギーを最も効率良く吸収できるように、浮体の運動速度と位相を制御できる」としていたが、その具体的な設定条件については触れていない。ここで、図 4.3.3 に立ち戻り、波力発電装置の運動方程式を式（参-2.8）と定義する。式（参-2.8）中の s、F_{b3}、s_{b3}は、それぞれ浮体の上下方向変位、浮力、復原力係数である。

$$\begin{aligned} m\ddot{s} &= F_{e3} + F_{r3} + F_{b3} + F_{f3} + F_{u3} \\ u &= \dot{s} \\ F_{b3} &= -s_{b3}s \end{aligned} \qquad (参\text{-}2.8)$$

式（参-2.8）は時間領域での運動方程式であるが、これをフーリエ変換により周波数領域の運動方程式に書き換えると式（参-2.9）となる。

$$\left[R_{33}(\omega) + R_{f3} + i\left\{\omega\left(m + m_{33}(\omega)\right) - s_{b3}/i\omega\right\}\right]\hat{u} = \hat{F}_{e3} + \hat{F}_{u3} \qquad (参\text{-}2.9)$$

ここで、式（参-2.9）の運動方程式に機械インピーダンス$Z_i(\omega)$を導入すれば、式（参-2.9）は式（参-2.10）と書き直せる。なお、式（参-2.10）中の機械インピーダンス$Z_i(\omega)$は式（参-2.11）で定義する。

$$Z_i(\omega)\hat{u} = \widehat{F_{e3}} + \widehat{F_{u3}} \qquad (参\text{-}2.10)$$

$$Z_i(\omega) = R_i + iX_i = R_{33}(\omega) + R_{f3} + i\left\{\omega\left(m + m_{33}(\omega)\right) - s_{b3}/i\omega\right\} \qquad (参\text{-}2.11)$$

ラディエーション流体力の場合と同様に、制御力F_{u3}に対してもインピーダンスの考え方を導入する。式（参-2.2）では、制御力は運動速度に比例する要素としてモデル化したが、ここでは式（参-2.12）のインピーダンスを持ったモデルに拡張する。

$$\hat{F}_{u3} = -Z_u(\omega)\hat{u} = -(R_u + iX_u)\hat{u} \qquad (参\text{-}2.12)$$

式（参-2.12）を式（参-2.10）に代入すると、式（参-2.13）を得る。

$$\{Z_i(\omega)+Z_u(\omega)\}\hat{u}=\hat{F}_{e3} \qquad (参\text{-}2.13)$$

有効パワーは、式（参-2.12）の両辺に、$1/2\hat{u}_3^*$を掛け、その実部をとれば良いので、式（参-2.14）で求めることができる。さらに、式（参-2.13）を用いて$\hat{u}_3$を消去すれば、有効パワーを機械インピーダンスと制御力のインピーダンスを用いて式（参-2.15）のように表すことができる。

$$P_u=\frac{1}{2}\mathrm{Re}\left[-\hat{F}_{u3}\hat{u}_3\right]=\frac{1}{2}\mathrm{Re}[Z_u(\omega)]|\hat{u}_3|^2 \qquad (参\text{-}2.14)$$

$$P_u=\frac{1}{2}\mathrm{Re}[Z_u(\omega)]\frac{|\hat{F}_{e3}|^2}{|Z_i(\omega)+Z_u(\omega)|^2}$$

$$=\frac{1}{2}\frac{R_u(\omega)|\hat{F}_{e3}|^2}{\left(R_i(\omega)+R_u(\omega)\right)^2+\left(X_i(\omega)+X_u(\omega)\right)^2} \qquad (参\text{-}2.15)$$

式（参-2.15）を見ると、$R_u(\omega)$を +0 に近づけるとP_uも +0 に収束し、$R_u(\omega)$が +∞ に発散するとP_uは +0 に収束する。式（参-2.14）より、$\mathrm{Re}[Z_u(\omega)]=R_u(\omega)$は正の値であるから、式（参-2.15）が最大値を取るのは$\partial P_u/\partial R_u=0$となる条件である。

$$\frac{\partial P_u}{\partial R_u}=\frac{\left|\hat{F}_{e3}\right|^2}{2}\frac{\left[\left(R_i(\omega)+R_u(\omega)\right)^2+\left(X_i(\omega)+X_u(\omega)\right)^2\right]-2R_u(\omega)\left[\left(R_i(\omega)+R_u(\omega)\right)^2\right]}{\left[\left(R_i(\omega)+R_u(\omega)\right)^2+\left(X_i(\omega)+X_u(\omega)\right)^2\right]^2}$$

$$=\frac{\left|\hat{F}_{e3}\right|^2}{2}\frac{\left(R_i(\omega)+R_u(\omega)\right)\left(R_i(\omega)-R_u(\omega)\right)+\left(X_i(\omega)+X_u(\omega)\right)^2}{\left[\left(R_i(\omega)+R_u(\omega)\right)^2+\left(X_i(\omega)+X_u(\omega)\right)^2\right]^2}$$

（参-2.16）

上式より、$\partial P_u/\partial R_u=0$となる場合、制御力のインピーダンスが式（参-2.17）を満たす必要がある。また、式（参-2.17）が成り立つとき、P_uの最大値は式（参-2.6）に一致する。

$$R_u(\omega)=R_i(\omega)=R_{33}(\omega)+R_f$$
$$X_u(\omega)=-X_i(\omega)=-\omega\left(m+m_{33}(\omega)\right)+{}^{S_{b3}}/_{\omega} \qquad (参\text{-}2.17)$$

ここまでは、入射波を正弦波とし、波から吸収するパワーを最大化する条件を述べてきた。以降は、任意の入射波とし、波から吸収するエネルギーを最大化する条件を調べる。

まず、周波数領域の運動方程式式（参-2.10）を逆フーリエ変換し、時間領域の運動方程式、式（参-2.18）を得る。なお、式（参-2.18）中の「$*$」は畳み込み積分を示す

$$\int_{-\infty}^{+\infty}z_i(\tau)u\,(t-\tau)d\tau=z_i(t)*u(t)=F_{e3}(t)+F_{u3}(t) \qquad (参\text{-}2.18)$$

時間領域で、瞬時の有効パワーは$P_u=-F_{u3}(t)u_3(t)$となるので、有効エネルギーは、式（参-2.19）で得られる。式（参-2.19）にパーシヴァルの定理および$F_{u3}(t)$と$u_3(t)$が実数であることを利用すれば、式（参-2.19）は式（参-2.20）と書き直せる。

$$W_u = -\int_{-\infty}^{+\infty} F_{u3}(t)u(t)d\tau \qquad （参\text{-}2.19）$$

$$W_u = \frac{1}{2\pi}\int_0^{+\infty}\{-F_{u3}(\omega)u^*(\omega) - F_{u3}^*(\omega)u(\omega)\}\,d\omega \qquad （参\text{-}2.20）$$

さらに、式（参-2.20）を代数的に式変形し、式（参-2.21）とする。

$$W_u = \frac{1}{2\pi}\int_0^{+\infty}\left\{\frac{|F_{e3}|^2}{2R_i(\omega)} - \left[\frac{F_{e3}F_{e3}^*}{2R_i(\omega)} + F_{u3}(\omega)u^*(\omega) + F_{u3}^*(\omega)u(\omega)\right]\right\}d\omega$$

$$= \frac{1}{2\pi}\int_0^{+\infty}\left\{\frac{|F_{e3}|^2}{2R_i(\omega)} - \frac{\alpha(\omega)}{2R_i(\omega)}\right\}d\omega \qquad （参\text{-}2.21）$$

ここでは、$\alpha(\omega) = F_{e3}F_{e3}^* + 2R_i(\omega)\{F_{u3}(\omega)u^*(\omega) + F_{u3}^*(\omega)u(\omega)\}$としている。

式（参-2.21）は、被積分関数の第 2 項が、制御力の設定が最適でない場合に生じる損失と考えることができる。この損失をゼロとすれば最適な制御が実現できているといえる。式（参-2.22）は 2 通りの式変形で整理でき、それぞれ式（参-2.23）、式（参-2.24）と表すことができる。

$$\alpha(\omega) = F_{e3}F_{e3}^* + 2R_i(\omega)\{F_{u3}(\omega)u^*(\omega) + F_{u3}^*(\omega)u(\omega)\} \qquad （参\text{-}2.22）$$

$$\alpha(\omega) = |F_{u3}(\omega) + Z_i^*u(\omega)|^2 \qquad （参\text{-}2.23）$$

$$\alpha(\omega) = |F_{e3}(\omega) - 2R_{33}(\omega)u(\omega)|^2 \qquad （参\text{-}2.24）$$

式（参-2.23）より、損失を「0」とするためには、制御力のインピーダンスが式（参-2.25）の関係を満たす必要がある。このように制御力のインピーダンスに着目する制御法を抵抗制御（reactive control）や複素共役制御（complex-conjugate control）といい、1970 年代から研究が進んでいた。

$$F_{u3}(\omega) = -Z_i^*u(\omega) \qquad \text{DOL}（参\text{-}2.25）$$

一方、式（参-2.24）より、損失を「0」とするためには、可動物体の運動速度および位相が式（参-2.26）を満たす必要がある。このように可動物体の運動速度と位相を制御パラメータとする制御法を振幅位相制御法（amplitude and phase control method）という。

$$u(\omega) = \frac{F_{e3}(\omega)}{2R_{33}(\omega)} \qquad （参\text{-}2.26）$$

＜参考資料＞

- 益田善雄．日本の波力発電—波に憑かれて四十余年．霞出版社，1987，184p.
- 高橋重雄．“波エネルギー変換装置の現状について”．土木学会附属土木図書館．http://library.jsce.or.jp/jsce/open/00027/1993/29-B01.pdf，（参照 2021-02-01）.
- Miyazaki T. et al., Research and development of wave power electricity generation systems. Oceanology International 78, 1978.
- Howstuffworks. ”Salters duck”. HOWSTUFFWORKS SCIENCE. http://science.howstuffworks.com/environmental/green.science/salters.duck.htm/, (cited 2021-02-01).
- Paul A. Lynn, “Ocean wave power”. Electricity from Wave and Tide. https://download.e-bookshelf.de/download/0003/9736/66/L-X-0003973666-0002485639.XHTML/index.xhtml, (cited 2021-02-01).
- 前田久明，木下健．波浪発電．生産研究．1979，第 31 巻，11 号，p.717-726.
- 海洋科学技術センター．波力発電装置「海明」の研究に関する総合報告．海洋科学技術センター，1981.
- 日本財団．“沖合浮体式波力装置「マイティーホエール」”．日本財団図書館．https://nippon.zaidan.info/seikabutsu/2001/00859/contents/00028.htm，（参照 2021-02-01）.
- The European Marine Energy Center ltd. “EMEC”. EMEC. http://www.emec.org.uk/, (cited 2021-02-01).
  The European Marine Energy Center ltd.“Pelamis Wave Power”.EMEC. http://www.emec.org.uk/about-us/wave-clients/pelamis-wave-power/, (2021-02-01).
- Water Pawer & Dam Construction ウェブサイト. https://www.waterpowermagazine.com/features/featurecoastal-conversions , (cited 2021-02-01).
- 今井康貴，豊田和隆，永田修一，瀬戸口俊明，高尾学．“浮体式 OWC「後ろ曲げダクトブイ型波力発電装置」の発電効率と運動に関する研究”．OTEC：佐賀大学理工学部附属海洋熱エネルギー変換実験施設報告，2012，vol.17，p.41-46.
- Ocean Power Technologies. “PowerBuoy”. Ocean Power Technologies. https://oceanpowertechnologies.com/new-homepage-alt/, (cited 2021-02-01).
- Wave Dragon. Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Wave_Dragon, (cited 2021-02-01).
- 神吉博．“ジャイロを利用した高効率波力発電装置”．科学技術振興機構平成 18 年度新技術説明会.
- 科学技術振興機構．“明日へのトビラ 独創的な再生可能エネルギー技術「ジャイロ式波力発電」”．JSTnews．2013，2013-7 月号，p.12-13.
- Hadano, Kesayoshi; Koirala, Pallav; Taneura, Keisuke; Ohgi, Kyo; Ohnishi, Toshiaki. On the Vertical Motion of Water in the Chambers for Wave Energy Converter. Proc. 23rd

International Offshore and Polar Engineering (ISOPE), 2013.

- Drew, B.; Plummer, A.R.; Sahinkaya, M.N. A review of wave energy convertor technology. Proc. Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 2009, vol.223, no.8.
- Cruz, João. Ocean Wave Energy : Current Status and Future Perspectives. Springer, 2010, 431p.
- Cruz, João. Ocean Wave Energy : Current Status and Future Perspectives (Green Energy and Technology). Springer, 2008, 431p.
- Ferri, F. et al., Balancing Power Output and Structural Fatigue of Wave Energy Converters by Means of Control Strategies, Energies. 2014. 7(4), p.2246-2273.
- Northwest Energy Innovations. "Northwest Energy Innovations". Northwest Energy Innovations. http://azurawave.com/, (cited 2021-02-01).
- Wedge Global. "Wedge". Wedge. https://wedgeglobal.com/ , (cited 2021-02-01).
- Seabased AB (publ). "Scalable Wave Energy Parks". Scalable Wave Energy Parks. http://www.seabased.com/en/, (cited 2021-02-01).
- 堀田平，宮崎武晃，鷲尾幸久，田中浩．ターミネーター型波エネルギー利用装置の研究．第 2 回波浪エネルギー利用シンポジウム．1987，p.1-10.
- 前田久明，山下誠也．波浪エネルギー一次変換装置．日本造船学会誌．1982，第 637 号，p.306-327.
- 益田善雄，宮崎武晃．消波発電装置"海明"の実験．海洋科学技術センター試験研究報告．1979，第 3 号，p.75-81.
- 鷲尾幸久，大澤弘敬，緒方輝久，中川寛之，岡山修三，永田良典．沖合浮体式波力装置「マイティーホエール」の発電出力．日本造船学会論文集．2001，第 190 号，p.395-405.
- 宮崎武晃，益田善雄，長崎作治．波力発電装置「海明」の研究開発（3）－海上実験と水槽実験間の関係と解析－，第 28 回海岸工学講演会論文集．1981，p. 589-593.
- 日本造船学会海洋工学委員会性能部会．実践 浮体の流体力学 前編－動揺問題の数値計算法．成山堂書店，2003.
- Suzuki, Masami; Kuboki, Toshiari. Characteristics of Floating Type Wave Power Generating System with Oscillating Water Column. Proc. 15th International Offshore and Polar Engineering Conference. 2005.
- Marjani A. EL; Castro, F.; Bahaji, M.; Filali, B. 3D Unsteady Flow Simulation in an OWC Wave Converter Plant. Proc. International Conference on Renewable Energy and Power Quality. 2006.
- 平尾春華，藤原敏文，國分健太郎，井上俊司．"振動水柱型波力発電施設の安全性評価を目的とした水槽試験及び数値計算"．第 26 回海洋工学シンポジウム講演集．2017，OES26-054.
- 元良誠三，小山健夫，前田久明，藤野正隆．船体と海洋構造物の運動学．成山堂書店，1997，362p.

- 高橋重雄，安達崇．固定式振動水柱型波力発電システムの設計と実験的検証．海岸工学講演会論文集．1988，Vol.35，p.837-841.
- 木下健他．System simulation and optimum design of OWC-Wells turbine wave power generator．東京大学生産技術研究所報告．1986，第 32 巻，5 号，32p.
- 木下健，増田光一，宮島省吾，加藤渉．固定式振動水柱型波浪発電装置に対する空気室内空気の圧縮性の影響について．日本造船学会論文集．1985，第 157 号，p.211-216.
- 永田修一，豊田和隆，今井康貴，瀬戸口俊明，中川寛之．浮体式振動水柱型波力発電装置「後ろ曲げダクトブイ」の一次変換効率解析法に関する研究．OTEC : 佐賀大学理工学部附属海洋熱エネルギー変換実験施設報告．2011，第 16 号，p. 61-66.
- 堀田平，宮崎武晃，鷲尾幸久，竹内俊介．振動水柱型波力発電装置の空気出力に関する基礎的研究－projecting wall 付き固定空気室－．海洋科学技術センター試験研究報告．1984，第 12 号，p.65-76.
- 木原一禎，大澤弘敬，有川太郎，増田光一，瀬戸口俊明，金谷泰邦．ユニット型多重共振波力発電装置（高効率発電装置）の開発．三菱重工技報．2012，Vol.49，No.4，p.52-60.
- 一般社団法人日本機械学会 流体工学部門 ウェブサイト．https://www.jsme-fed.org/newsletters/2008_12/no5.html, https://jsme-fed.org/newsletters/2012_12/no3.html，（参照 2021-02-01）.
- 吉田宏一郎．海洋構造力学の基礎．成山堂書店，2010，345p.
- Hals, Jørgen; Falnes, Johannes; Moan, Torgeir. A Comparison of Selected Strategies for Adaptive Control of Wave Energy Converters. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering. 2011, Vol.133, Issue3.
- National Renewable Energy Laboratory and Sandia Corporation. ”WEC-Sim (Wave Energy Converter SIMulator)”. WEC-Sim. https://wec-sim.github.io/WEC-Sim/, (cited 2021-02-01).
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構．“風力等自然エネルギー技術研究開発／海洋エネルギー技術研究開発／海洋エネルギー発電技術共通基盤研究．平成 23～24 年度成果報告書”.
- European Marine Energy Center. Tank Testing of Wave Energy Conversion Systems. European Marine Energy Center ltd. 2009, 88p.
- Mackay, Ed; Cruz, Joao; Retzler, Chris; Arnold, Peter; Bannon, Elva; Pascal, Remy. Validation of a New Wave Energy Converter Design Tool with Large Scale Single Machine Experiments. Asian Wave and Tidal Conference Series (AWTEC2012). 2012, p.1-12.
- 日本造船学会海洋工学委員会性能部会．実践 浮体の流体力学 後編－実験と解析．成山堂書店，2003.
- 土木学会．水理公式集．昭和 46 年改訂版，土木学会，1971，616p.
- 日本船舶技術研究協会，海上技術安全研究所，東京大学．波力等海洋エネルギー発電施設の安全対策のための調査研究報告書．日本船舶技術研究協会，海上技術安全研究所，東京大学，2015.
- 木下健他．空気タービン式波浪発電装置の総合設計と特性解析（第 1 報）．生産研究．1983，

35 巻，8 号，p.33-36.

- 笹原裕太郎，増田光弘，南清和．岸壁設置式 OWC 型波力発電装置の MPS 法による数値シミュレーションに関する基礎的研究．日本航海学会論文集．2016，Vol.135，p.177-183.
- 堀田平，宮崎武晃，鷲尾幸久，林秀明．振動水柱型波力発電装置の並列配置効果の研究．海洋科学技術センター試験研究報告．1986，第 17 号，p.87-97.
- 宮崎武晃，益田善雄，長崎作治．波力発電装置「海明」の研究開発（2）．第 27 回海岸工学講演会論文集．1980，p.114-118.
- 宮崎武晃，堀田平．マルチレゾナンス式振動水柱型波力発電装置の研究．第 32 回海岸工学講演会論文集．1985，p.707-711.
- Falcão, António F.O.; Henriques, João C.C.
  Model-Prototype Similarity of Oscillating-Water-Column Wave Energy Converters. International Journal of Marine Energy. 2014, Vol.6, p.18-34.
- Falnes, Johannes. Ocean Waves and Oscillating System. Cambridge University press, 2002, p.118-142.

5 潮流・海流発電システム

潮流・海流発電は、基本アイデアは風車に類似しているが、実用化に向けては研究開発の途上にある。したがって、基本原理は明確になりつつあるものの、施工技術や維持管理技術を細かく議論する段階には至っていない。ここでは、基礎原理に軸足をおいた説明になるが、開発の方向性を感じ取ってほしい。

この分野の概略については、「5.1 概説」のみを読んでいただければこと足りる。もう少し解析的に勉強したい読者は、各論に進んでいただきたい。

5.1 概説

潮流は、月と太陽の引力で生じる周期的な変動である潮汐によって起こる水平方向の流れである。海底の地形、特に沿岸部やその他の狭窄部（島など）により変化し、流路が狭い地点では流速が速くなる。潮の干満によって流れるため（図 5.1.1）、そのタイミングと規模はかなり予測可能であり、発電に利用する場合の長所となる。また、流れがほぼ止まる時（憩流）があるため、作業を行う上で好都合である。ただし、狭い流路では大規模化が制限される他、乱れが大きいという短所もある。また、流向が反転すること（転流）に対応した装置が必要である。

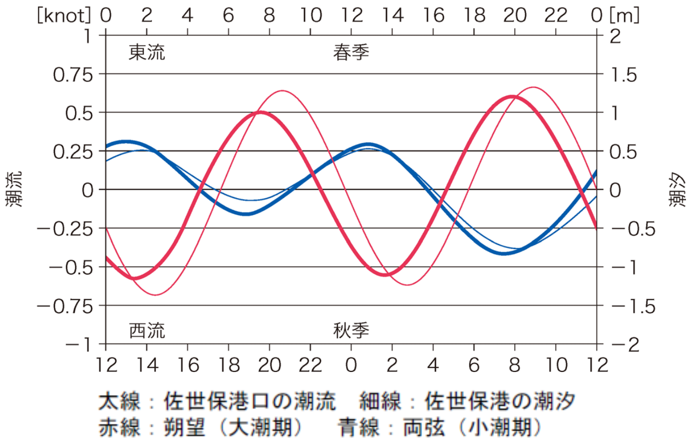


図 5.1.1　潮流と潮汐の時間変化の例
（出典：NEDO、2013）

海流は、太陽熱と偏西風などの風によって生じる大洋の大循環流であり、地球の自転と地形によってほぼ一定の方向に流れている。図 5.1.2 に日本周辺の海流を示す。これらの海流は連続的に同一方向に流れ、一般的には流速、流量および流路の変化は少ない。また、エネルギー量も大きい。地形的な制約が少ないため大規模化・ファーム化が可能であるが、潮流発電の適地よりも水深が深く、また離岸距離が大きいため初期コストは大きくなる。なお、世界的な主要海流の一つである黒潮（日本海流）は、幅 100km、水深数百 m にも及ぶため膨大なエネルギーを持つが、大蛇行と呼ばれる流路の変化を起こす場合があるため、設置海域に注意が必要である。

図 5.1.2　我が国周辺の主な海流
（出典：海上保安庁ウェブサイト）

潮流・海流発電は、このような流れの運動エネルギーを利用するものである。一般的には水車によって回転エネルギーに変換することから、技術的には風力発電と共通する部分が多いが、キャビテーションの発生や海面下の厳しい条件（腐食、海洋瓦礫、生物付着など）を考慮しなければならない。

潮流発電と海流発電の違いを表 5.1.1 にまとめる。

表 5.1.1　潮流発電と海流発電の比較

		潮流	海流
環境	流速	正弦波状・周期的に変化	ほぼ一定
	流向	周期的に反転	ほぼ一定
	資源量	小	大
	設置水深	浅海域（着床式可能）	比較的深海域
技術	設置難易度	小	大
	ロータ※1	全流向型（2 流向型）※2	単流向型
	負荷変動	大	小
	起動性	低流速での高い起動性が必要	起動性よりも設計流速における発電性能を重視

※1：一部にはロータを用いないものもある（後述）。
※2：流向により単流向型の発電装置全体の方向を変える方式もある。

5.1.1　技術の歴史

潮流・海流発電の研究開発は、1970 年代に始まったと言われている。我が国では日本大学がダリウス（Darrieus）型水車を開発し、愛媛県今治市沖の来島海峡において 1983 年に世界で初めて潮流発電に成功した（図 5.1.3）。また、2008 年に九州大学は長崎県平戸市の生月大橋においてダリウス・サボニウス（Darrieus-Savonius）混合水車を用いた実海域実験を行った（図 5.1.4）。実用面では、2002 年に海上保安庁が明石海峡に浮灯標電源用の小型の潮流発電システムを設置したが、電力供給用の潮流発電システムの実用化には至っていない。

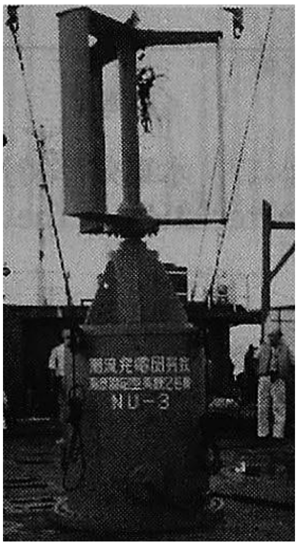


図 5.1.3　日本大学の実験水車（ダリウス型、1986～1988 年）
（出典：木方靖二、塩野光弘、1992）

図 5.1.4　九州大学の実海域実験（ダリウス・サボニウス混合水車）
（出典：経塚雄策、2014 による図を一部改変）

近年では、NEDO による実証研究が実施されている。詳しくは次節で紹介する。

技術的な課題は、NEDO により表 5.1.2 がまとめられている。この表には、他の再生可能エネルギーにも共通する幅広い内容が網羅的に含まれている。潮流・海流発電では、特に高効率化、低価格化、信頼性および保守整備（メンテナンス）性が重要と考えられる。

表 5.1.2　潮流・海流発電の技術課題

技術課題			解決策・要素技術
発電コストの削減	発電効率の向上		・発電機の高効率化 ・適地の選定（海洋環境の調査・モニタリング、マップ化 ・ヨー角の最適制御
	イニシャルコストの削減	設備費の削減	・大量生産による量産効果 ・材料の低コスト化 ・係留コストの削減 ・送電線コストの削減
		施工費の削減	・低コスト施工技術の確立
	ランニングコストの削減		・メンテナンスコストの削減
高耐久化	海洋環境への対応		・海洋生物の付着防止（防汚塗料の塗布、音・超音波システム、オゾンガスの海洋混合等） ・塩害・さびの防止（防腐食塗料の塗布等） ・漏水防止、密閉技術
	機器に係る負荷の緩和		・キャビテーションの防止 ・乱流強度、乱流状況の把握
管理・運用	出力の平滑化（主に潮流発電）		・エネルギー貯蔵（フライホール、油圧アキュムレータ、圧縮空気タンク、電池、熱エネルギー等）
	設備の維持管理・故障の防止		・モニタリングシステム、遠隔操作システム ・海洋環境の予測システム ・海水中の浮遊物の除去
	環境への影響		・実証試験による基礎データの収集

（出典：NEDO、2010 による表を参考に作成）

我が国周辺では流速の大きい海域があまり多くないため、全体としての発電量を上げるためには低速でも稼動する水車が望まれる。発電機等の改良も行う必要があるが、ロータについては、図 5.1.4 のように効率の良いダリウス型と起動性の良いサボニウス型を組み合わせる工夫が行われている。また、ダリウス型のブレードは、回転に伴って角度が 360deg 変化するため、流れに対する迎角が大きく変化し、必ずしも常に最適な条件で稼動するわけではない。そこで、ブレードの角度を制御にして起動性と効率を上げる研究も実施されている（図 5.1.5)。ただし、制御パラメータは流向によって変える必要が生じる。このアイデアは、フォイト・シュナイダー・プロペラ（Voith-Schneider propeller、垂直軸型全方向推進器）の技術を逆に使ったものといえる。

図 5.1.5　ダリウス型可変ピッチ水車
（出典：居駒知樹等、2014 による図を一部改変）

また、水車に流入する流速そのものを高くするため、シュラウド（shroud、側板）を付加する工夫も行われている（図 5.1.6）。風車と同じ原理で発電量は流速の 3 乗に比例するため、起動性の向上とともに発電量を増加させる効果も大きい。

図 5.1.6　シュラウド付潮流タービン
（出典：Kyozuka Y. et al.、2012）

大型の水平軸風車では、機器の安全性を保つため、定格風速以上でブレードピッチ角を調整して風を逃がし、発電量（回転数）を一定に保つことが通常である。しかし、海流・潮流発電装置に防水仕様の同様な機構を設けることは、機器の大型化とコスト上昇を招く。また、信頼性の面からも複雑な機構はできるだけ避けた方が良い。そこで、流速が高い場合にブレードが適当な角度にねじれ、負荷を低減する弾性タービンが考案されている（図 5.1.7）。

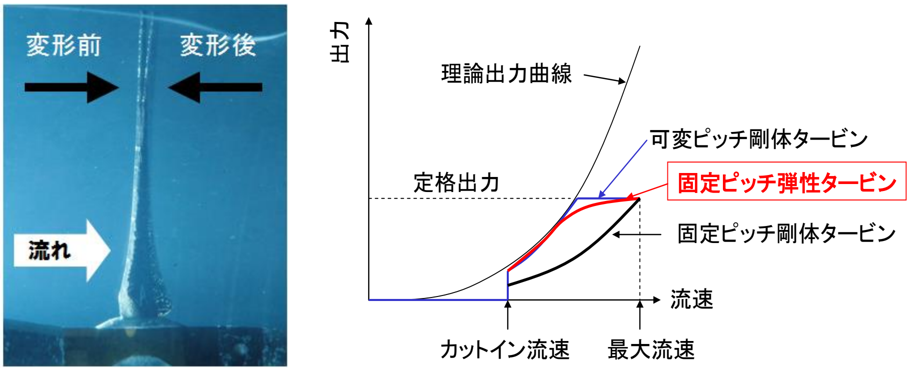


図 5.1.7　弾性タービン
（出典：山口一、2011）

その他にも、例えばロータを前後に配置して二重反転方式とし、上流側ロータ後流のエネルギーを下流側ロータで利用する方法など、様々な研究が行われている。

5.1.2 構造形式

(1) 発電機構の形式

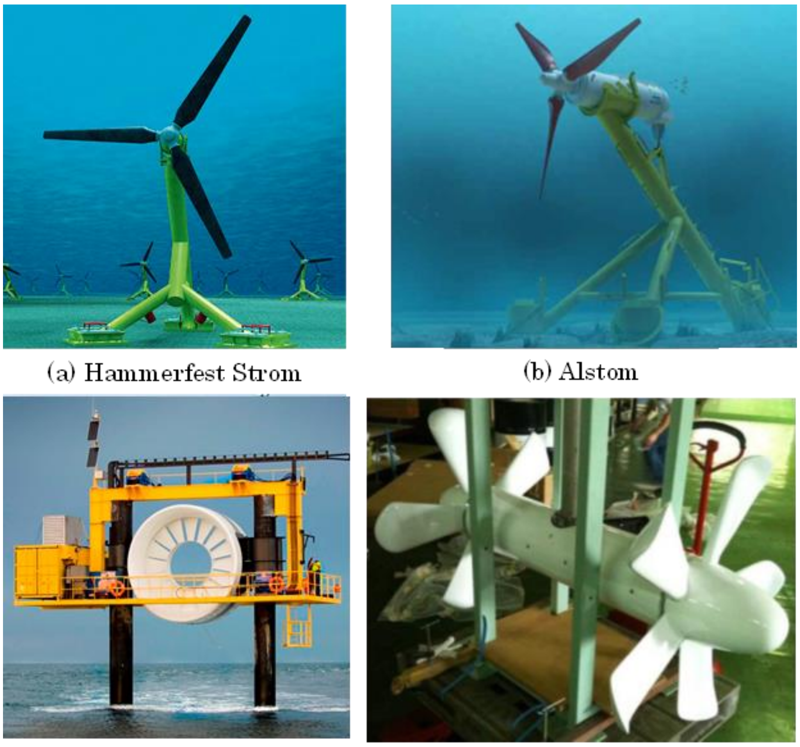
発電機構は、水平軸型タービン、垂直軸型タービン、往復運動型に大別できる。風車よりも開発の歴史が浅く、また規模も様々なことから、様々な形式の研究が続けられている。

① 水平軸型タービン

水平軸型タービンは、風車と類似のブレード形状を持ちブレードピッチ制御を行うものもあるが、海水の密度の大きさやキャビテーション防止等の観点からブレード形状も様々なバリエーションが検討されている。

図 5.1.8 の(a)は風車と同様のアスペクト比の大きいブレードを採用している。同図(b)は、海水の密度が空気の約 800 倍であることを考慮してブレード形状を変化させている。同図(c)は円筒ケースの内側にブレードを配置しており、魚類は中央を通過できるとしている。同図(d)は、飛行機の翼と同様なウィングレット（winglet）をブレード端に設け、また二重化することで効率向上を意図している（5.2.1(1)参照）。

この他にも、5.1.1 項で紹介したダクト（シュラウド）付きのものや弾性タービン等がある。



(a) Hammerfest Strom　(b) Alstom
(c) OpenHydro　(d) ウィングレット付き逆テーパー翼

図 5.1.8　水平軸型タービン
（出典：(a)AndritzHydro Hammerfest 社ウェブサイト、(b)EMEC ウェブサイト、(c)OpenHydro 社ウェブサイト、(d)広部智之等、2014）

② 垂直軸型タービン

垂直軸型タービンは、水平軸型のように開発事例は多くないが、流向の影響を受けないという長所から検討が行われている。図 5.1.9 に示すように、単純に浮体下に設置したものもある。一方、支持部の曲げモーメントを逃がすために柔軟な構造とし、ブレード形状を工夫して、傾斜による発電性能低下を抑えるというコンセプトもある。

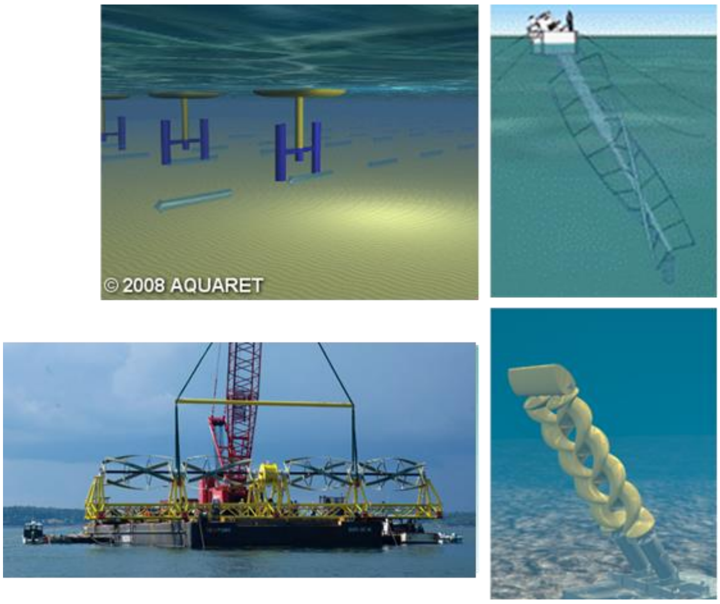


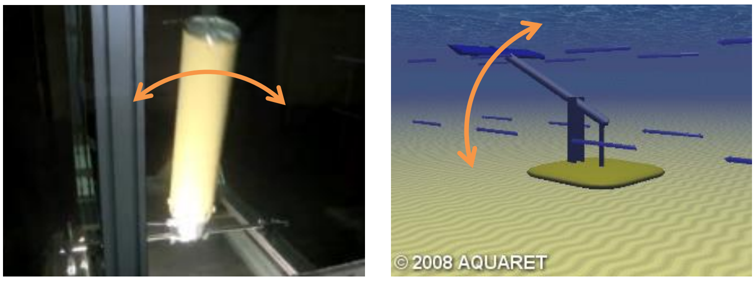
図 5.1.9　垂直軸型タービン
（出典：（左上）Aqua-RET ウェブサイト、（右上）Albatross Technology LLC ウェブサイト、（左下）Blue Tidal Energy 社ウェブサイト、（右下）Tidetec 社ウェブサイト）

③ 往復運動型

図 5.1.10 に往復運動型の事例を示す。往復運動型の一つは、渦励振（VIV：Vortex Induced Vibration）の原理を用いたもの（図 5.1.10 左図）である。円柱の後方には図 5.1.11 に示すようにカルマン渦が左右交互に発生し、これが起振力となって VIV が起こる。これを利用し、振動する円柱の根元に発電機を設置することで、エネルギーを取り出すことができる。

もう一つは振動翼型（図 5.1.10 右図）である。振動翼の問題は、魚の推進機構からヒントを得た振動翼推進、あるいは波粒子の運動を利用した波食い推進として研究されているが、発電への利用はこの逆問題といえる。

なお、一般的に発電効率は、施設の投影面積を通過するエネルギーと発電量の比として定義されるが、往復運動型は投影面積が条件によって変化するため、発電効率の定め方が確立していない。



Hydro-VENUS　　振動翼型

図 5.1.10　往復運動型
（出典：（左）岡山大学大学院環境振動エネルギー学研究室ウェブサイトの図を一部改変、（右）Aqua-RET ウェブサイトの図を一部改変）

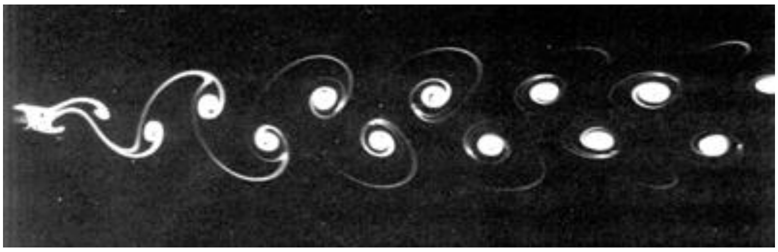


図 5.1.11　カルマン渦
（出典：九州大学流体科学研究室ウェブサイト）

以上述べたように、発電機構の形式は水平軸型、垂直軸型、往復運動型に大別できるが、5.2 節と 5.3 節では、比較的研究開発が進んでいる水平軸型と垂直軸型について解説している。

(2) 支持構造物の形式

潮流・海流発電施設の支持構造物は、着床式、浮体式および水中浮遊式に大別できる。

着床式は、海底に基礎を置く形式である（図 5.1.12）。着床式風車で実績の多いモノパイルの他にもいくつかの方法が検討されており、海底地盤や水深等の諸条件を考慮して使い分けられるものと考えられる。なお、海面上の露出部がないものは、船舶の航行を妨げないという利点がある反面、保守は困難である。

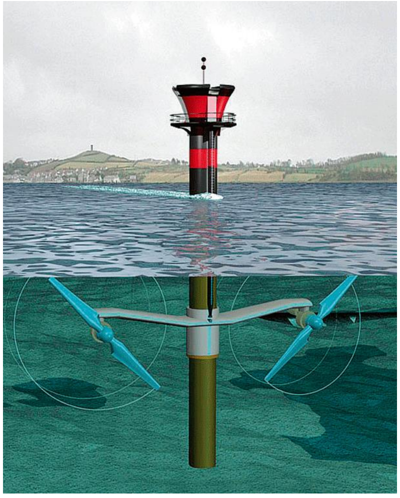


図 5.1.12　着床式発電施設
（出典：Sea Generation 社ウェブサイト）

浮体式は、浮力により水面上に一部が露出する形式である（図 5.1.13）。この形式は露出部から内部にアクセス可能なため保守が容易である。一方、波浪荷重を受けるため、係留ラインを含めて十分な強度を確保する必要がある。また、発電性能に大きな影響を与えないよう、動揺対策も必要である。

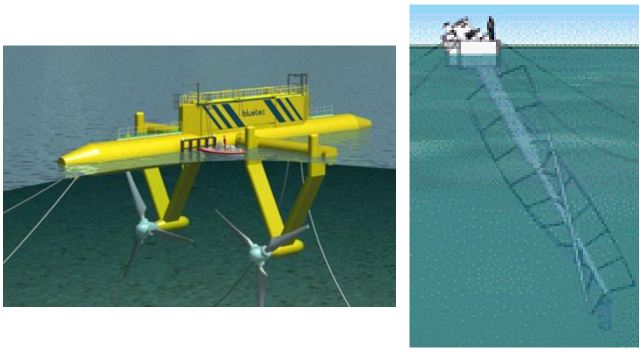


図 5.1.13　浮体式発電施設
（出典：（左）EMEC 社ウェブサイト、（右）Albatross Technology LLC 社ウェブサイト）

水中浮遊式は、海底・水面から共に離れた深度で稼動する形式である（図 5.1.14）。浮体をベースにする形式も考えられるが、船舶の航行を妨げないよう大部分のコンセプトは係留によって海底から支持されている。係留の本数を多くして位置保持機能を高めたものもあるが（図 5.1.14 左下）、我が国で研究開発が進んでいるのは図 5.1.14 上図のように係留本数を絞ったコンセプトである。この方式では、風見鶏効果によって流向の変化に対応できる他、保守のために浮上させることも可能である。なお、ロータ数は偶数のものが多いが、これは回転に伴う反力としてのトルクを打ち消すためである。

特殊なものに、揚力を利用する形式がある（図 5.1.14 右下）。これは凧が振れ回ることと同じ現象を利用し、積極的に 8 の字運動をさせることで、海域の流速の数倍の流れをロータに与えることを目的としている。

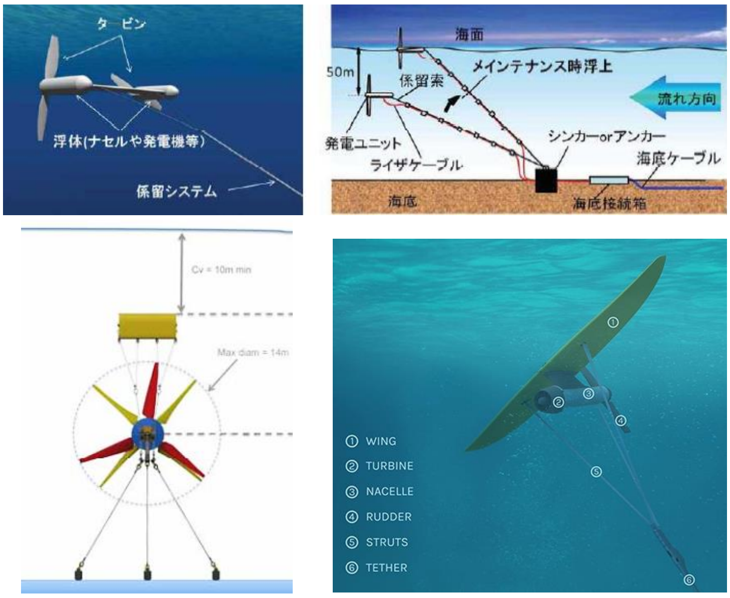


図 5.1.14　水中浮遊式発電施設
（出典：（上）NEDO、2015、（左下）Renewable Energy Focus ウェブサイト、
（右下）Marine Energy Research 社ウェブサイト）

5.2 水平軸型

5.2.1 基本メカニズム

(1) ロータ

ロータに係る流体力学的な基本メカニズムは風車と同一（3.1.1 項参照）であるが、水車と風車を比較した場合、海水の密度は空気密度のおよそ 800 倍と大きな差があり、技術が全く同一のものとはならない点に注意が必要である。例えば、飛行機のプロペラと船舶のプロペラが異なる形状を有するように、ブレードの最適な形状には差異が生じる。これは密度の差から、面積が同一であれば低回転数でも良好なエネルギー取得が可能とされるためである。また、浮力の有無から自重の影響が少ないことや、一様流の速さが異なることも影響し、ブレード形状は風車と異なった比率／形状のものが提案されている。図 5.2.1 の右側では、飛行機の翼と同様なウィングレットをブレード端に設けることで効率向上を意図している。

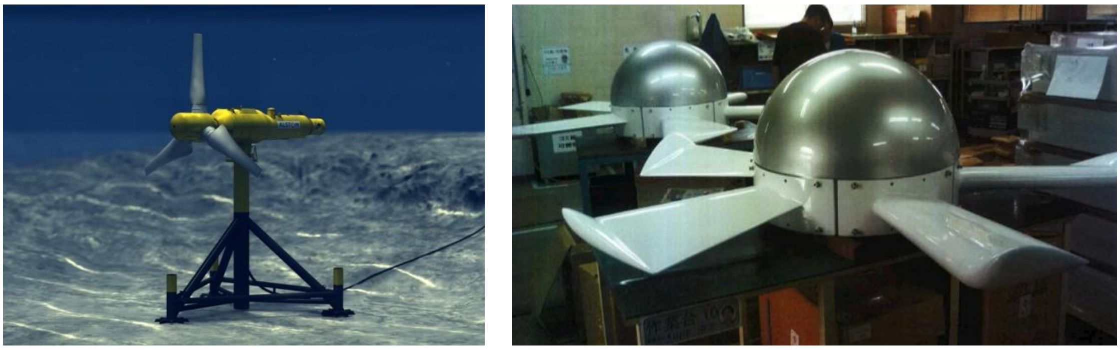


図 5.2.1　潮流・海流発電用プロペラ
（出典：（左）Ramboll ウェブサイト、（右）NEDO、2014）

(2) 支持構造に作用する荷重

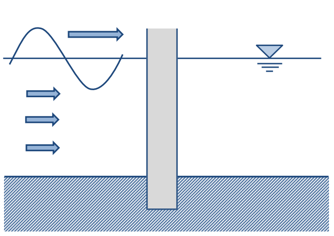
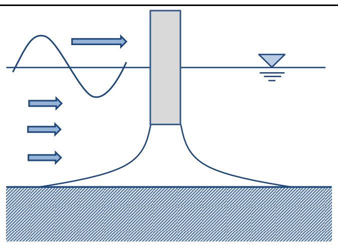
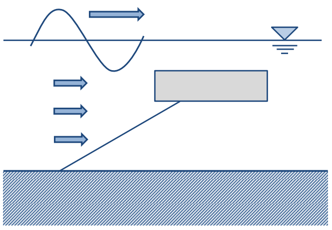
水車の支持構造は、大別して着床式、浮体式、水中浮遊式の 3 種類がある（表 5.2.1）。前の二つは洋上風車でも見られるものであり、三つ目の水中浮遊式は水車独自の技術である。水中浮遊式とは、水車タービン全体を水没させ、自重、浮力、そして係留反力のバランスによって位置保持する手法である。係留本数を絞ることでコストを抑えるとともに、流向の変化に自動的に追随することを狙っている。システムによっては、追加で浮力調整バラストを設置し、位置保持調整を容易に行えるものもある。

このような支持構造の差異によって、支持構造に作用する荷重が異なる点についても注意が必要である。また、着床式が位置変化を生じないのに対し、浮体式および水中浮遊式では位置変化が生じる。支持構造物によって共通する荷重としては、ロータの発生する荷重、潮流・海流力、波力、重力、浮力、海底面からの抗力がある。次に、支持構造ごとに異なる荷重について検討する。

着床式では、上記に示した荷重のみを検討すれば良い。次に浮体式では、係留に伴う係留反力と、支持構造の動揺に伴う慣性力について検討する必要がある。また、水中浮遊式

では、設置深度にもよるが、波の影響が比較的小さくなる可能性が高い。これは、微小振幅波理論において波の軌道は水深に対して指数関数的に減少するためである。慣性力についても考慮が必要な点は浮体式と同様である。

表 5.2.1　支持構造物の形式と考慮すべき荷重

荷重	着床式	浮体式	水中浮遊式
			
波	○	○	△
流れ	○	○	○
海底面抗力	○	○	○
重力	○	○	○
浮力	○	○	○
係留反力	X	○	○
慣性力	X	○	○

5.2.2 数値計算技術

潮流・海流発電の設計にあたっては、前述の構造形式を踏まえ、適切な安全性を確保したうえで建造、保守コストを低減させなければならない。本項では、その中でロータ性能と発電施設全体の挙動に着目し、解析技術を概説する。

(1) ロータ性能

水平軸型水車のロータ性能解析には、先の風車の項目において示した翼素運動量理論が利用できる。また、その他の理論として渦系の循環に着目した渦理論や渦理論と運動量理論を組み合わせた局所循環法、加速度ポテンシャル法などが存在する。風車では、アスペクト比の大きい細長いブレードが使用されるため、2 次元理論をベースとする翼素理論が適用できたが、水車のブレードには 2 次元的でないものもあるため、ブレードに適した理論を選ぶことが重要である。

近年では数値計算技術の発展により、汎用 CFD ソフトウェアを用いて翼まわりの 3 次元流体流れを直接評価する方法もしばしば利用される。

水平軸型の翼素運動量理論については 3.1.1 項にて述べたため、本項では割愛する。

① 渦理論

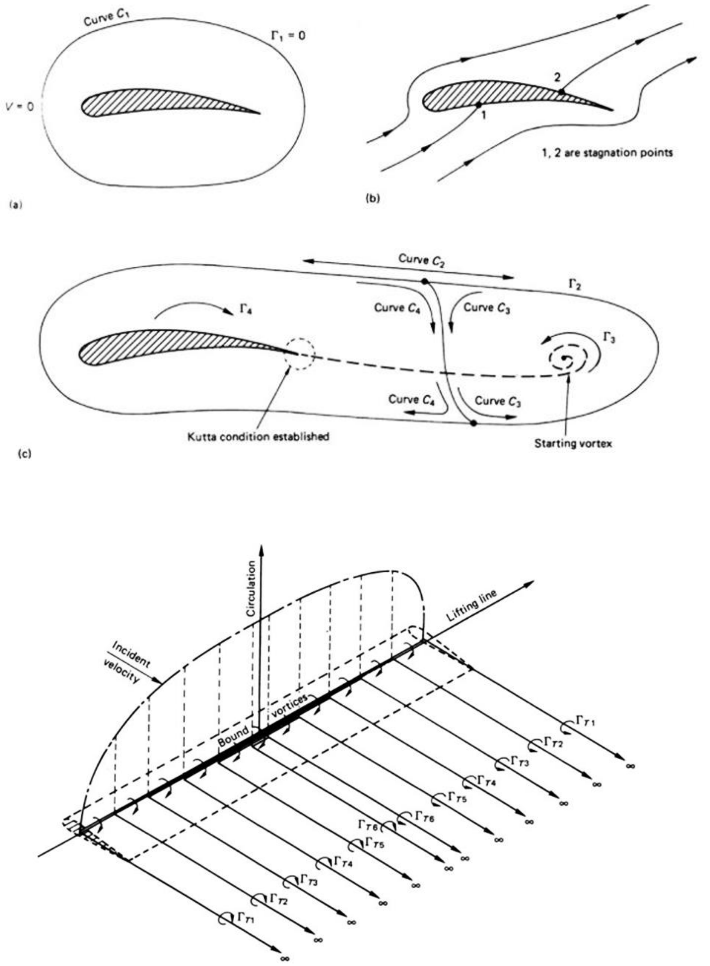


図 5.2.2　渦理論の概念図
（出典：Carlton J.S.、2007）

渦理論は渦系からの誘導速度を直接推算する方法である（図 5.2.2)。翼面上では揚力に釣り合うだけの循環量が発生し、この循環量は翼幅方向に分布を持つ。各翼幅位置における隣り合う循環の大きさの差は、その点における翼幅方向の流体の速度差を生じ、これが縦渦の原因となる。循環量が連続的に変化する翼の後方には無数の渦が連なっており、これが全体の渦系を形成している。渦理論は翼が作り出す渦（翼束縛、後縁渦、吐き出し渦、翼端渦など）によって翼面上に誘起される速度を見積もる方法であり、翼素運動量理論で直接扱えなかった 3 次元影響（翼端渦の影響）を考慮することができる。

誘導速度の計算にはビオ・サバール（Biot-Savart）の法則を用いているが、その際、ロータ翼を一本の渦線として扱う方法（揚力線理論（lifting line theory））と翼面上に配置した渦群で扱う方法（揚力面理論（lifting surface theory））とがある（図 5.2.3)。

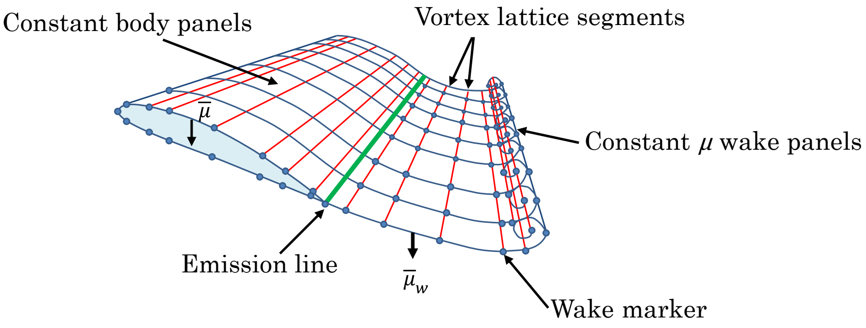


図 5.2.3　揚力面理論の概念図

② 局所循環法

局所循環法は、運動量理論の欠点を補い、かつ渦理論の複雑さ、および計算上の問題点を取り除くために、誘導速度の算出過程を単純化した近似解法である。

翼を N 個の仮想的な楕円翼で近似し、その翼根側の吹き下ろしを無視することにより、繰り返し計算なしで翼自身が出す誘導速度を計算する。先行翼が残していった誘導速度は、時間的減衰を示す誘導速度変化率（減衰係数）を導入することによって、空間的・時間的変化を推算している。この方法は、翼のピッチ角の変化や流れの乱れの影響を比較的簡単に導入でき、また翼の作り出す後流の影響等も簡単に取り組むことが可能である。計算上、発散の心配もなく、かつ計算時間が渦理論に比べて圧倒的に短く、その計算精度は固定後流渦法と同程度である。この方法では翼が残す渦の大きさを評価する減衰係数の推定が重要である。

(2) 施設全体の数値解析

浮体式風車の項目では、ロータの発生する荷重と支持構造の変位が相互に影響するため、連成解析が重要であることを示した。潮流・海流発電施設についても、浮体式あるいは水中浮遊式の支持構造を有する場合には、同様に連成解析を実施することが望ましい。特に、例えば図 5.2.4 に示した海流発電施設は、左右に配したロータの荷重によってバランスをとっているため、ロータ荷重変動が支持構造運動に影響し、またそれに伴う相対流向・流速の変化がロータの発生荷重に影響を及ぼす。このような相互影響の強い系について施設全体の挙動や安全性を検討する場合には、連成解析が重要である。ここでは、連成解析の一例として、先に挙げた水中浮遊式双発海流発電施設について機構解析を実施する手法について概要を述べる。

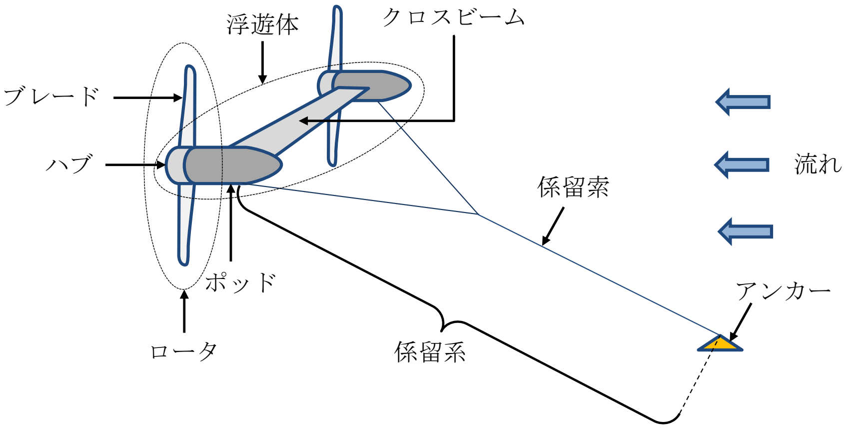


図 5.2.4　水中浮遊式双発海流発電施設の構成

機構解析とは、マルチボディダイナミクス（MBD：MultiBody Dynamics）とも呼ばれ、様々な部品（ボディ）で構成される機構・構造系（マルチボディシステム）の動きを、コンピュータを用いて解析し、ものづくりや研究に役立てる学問・技術である（図 5.2.5）。機構解析では、複数の部品から成るモデルに、各部品の質量・慣性特性や拘束条件・強制変位、荷重、重力などを定義することで、各部品に発生する運動（位置、速度、加速度）を時刻歴で計算する。基本的には各部品を剛体として扱い、1 部品を 6 自由度で表現するが、FEM モデルの導入も可能である。モデルの中に数多くの部品を取り込めるため、開発の自由度は高いが、解析目標に対して適切なモデリングを行う必要がある。

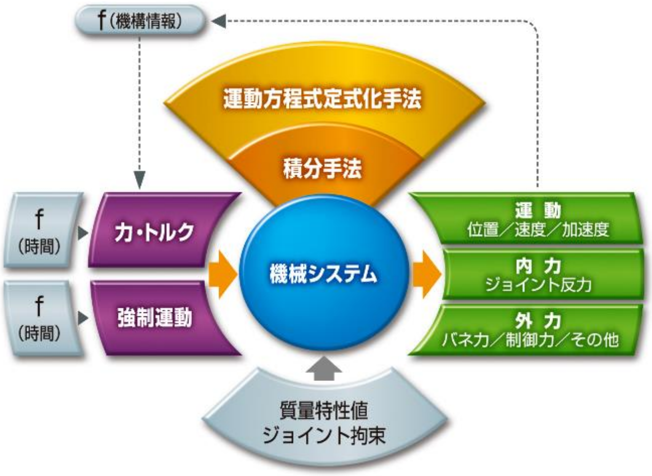


図 5.2.5　機構解析ソフトウェアの構成
（出典：FunctionBay 社ウェブサイト）

機構解析の実施に際しては、対象物体についてどのような特性を与え、力を設定するかが重要である。ここでの説明に際しては、機構、外力の 2 点に着目して説明する。今回、解析対象として想定する水中浮遊式海流発電施設は、図 5.2.4 に示したように二つのロータ（ブレード部および発電機機構を含むポッド）、ポッド同士を接続するクロスビーム、そ

して海底面と繋がる係留系によって構成される。機構については、これらの部材をそのまま設定すれば良い。ただし、係留については全体の運動が大きくなった際のことを考慮すると、弾性体として設定することが望ましい。また、計算条件によっては海底面を設定し接触判定を加える、あるいは水線面を設定して浮上した際の浮力変動を考慮する必要もある。

考慮すべき基本的な荷重は、ロータの発生するスラスト・トルク、重力、浮力、波力、係留反力、潮流力、そして慣性力である。ただし、構造形式において述べたように、水中浮遊式の場合は波力が相対的に小さいとみなすことが可能になる場合もある。スラスト・トルクは、相対流向・流速によって時々刻々変化させるように設定させなければならない。重力・浮力は鉛直方向の一定荷重として、各機構の重心あるいは浮心に作用させる。また、運動に起因する荷重として慣性力（付加質量）と流体の抵抗についても考慮する必要がある。

図 5.2.6 に示したのは、機構解析ソフトウェアの 1 画面である。荷重をモニターしたい部分にジョイントを設け、分割したボディを接続している。係留ラインとの接続部は球体ジョイントとして回転を自由にし、引張り力だけをモニターしている。その他のポッド中央部、クロスビーム中央部、ロータ中央部、ブレード根は固定ジョイントとしているため、ここに 6 分力ロードセルを設けた場合と同様に、直交する 3 軸方向の力と軸回りのモーメントをモニターすることができる。

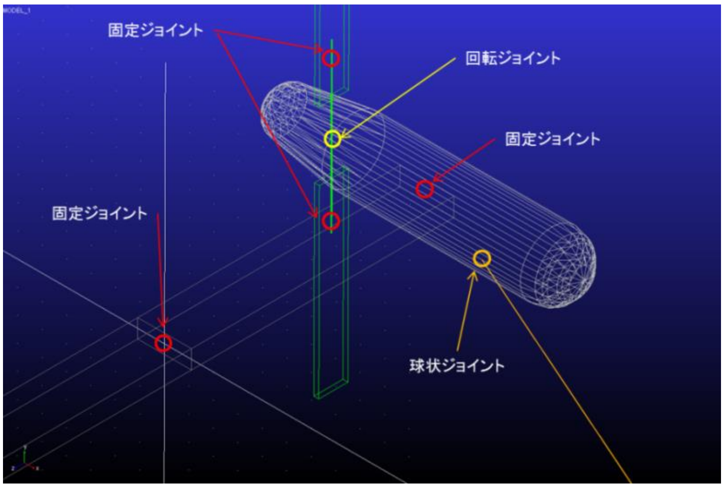


図 5.2.6　機構解析ソフトウェアによる水中浮遊式海流発電施設のモデル

5.2.3 水槽実験技術

数値計算による連成解析は非常に有効な手段であるが、モデル化を行う上で何らかの近似が入るため、特に潮流・海流発電施設のように実績のない構造物については、実現象を直接計測できる模型試験が必要不可欠といえる。

ここでは、最も複雑な挙動を示すものとして前項で取り上げた水中浮遊式双発海流発電施設を例として、水槽試験法の概要を述べる。

(1) スケールの設定、外部条件の設定

あらゆる模型試験について共通することであるが、海流発電施設の模型試験において最初に決定することはスケール（縮尺）である。スケールの設定については、一般的な船舶・海洋構造物試験と同様に、フルード数をまず合わせる。ロータの性能についてはレイノルズ数や周速比を合わせることが望ましいが、一般的には難しいため、それらをできるだけ目標値に近づけた上で荷重を合わせることが多い。

外部条件については、空間的・時間的に一様な流れをまず想定するが、地形影響の大きい潮流の場合やロータ直径が大きい場合など、目的に応じて変更する必要がある。既に述べたように、浮体式であれば波の影響も十分に考慮する必要があるが、水中浮遊式であれば波の影響については考慮しないことも可能である。

(2) 実験施設

潮流を模型試験で再現するためには 2 通りの方法がある。一つは模型を曳航する方法、もう一つはポンプ等を使用して水槽中に流場を作る手法である。ただし、後者の場合は膨大な設備が必要になることと、一様流を作り出すことが技術的に困難であるため、一般的には模型を曳航する手法が採用されることが多い。こちらの手法であれば、ロータ面に流入する流れを全面一様に保つことが可能となる。ただし、ロータに一様流が流入する状態の再現時間は水槽の全長と設定した一様流速度によって決まるため、十分な事前検討が必要である。

(3) 模型・計測項目・計測点

模型について述べる前に、必要な計測項目について述べる。ここでは、例として図 5.2.7 のような水中浮遊式海流発電施設について考える。まず、もっとも重要な計測項目は、ロータの状態、すなわち回転数、スラスト、トルクである。次に、模型の変位や係留張力も計測する必要がある。また、図 5.2.7 に示す模型では、クロスビーム中央部に大きな荷重がかかることも想定されるため、このような箇所の荷重計測も重要である。

模型については、ロータ主要部、すなわちブレードから発電機構までの部分を最初に検討すると良い。特に図 5.2.7 の双発水中浮遊式では、左右のトルクバランスが本体挙動に影響を及ぼすため、流体力に起因するトルクを発電機構を模擬する制動モータのトルクで調整できるように設定すると、様々な周速比での試験が実施しやすい。

また、これは水中浮遊式に特筆されることであるが、静水中で水平を保つように本体の浮心位置と重心位置、特に前後位置を一致させることが必要である。静水中で水平を保てない場合、曳航中にクロスビームに揚力が発生したり、スラスト荷重が水平ではない向きに発生するため、力学的に釣合が複雑な状況になる。設計段階における十分な重量バランスの確認と、微小なトリム調整を行うための機構を設置することが重要である。加えて、万が一の模型内部への漏水に備え、排水装置の設置が望ましい。

図 5.2.7　水中浮遊式双発海流発電施設の模型外形
（出典：海上・港湾・航空技術研究所海上技術安全研究所提供）

(4) レイアウト

試験における機材レイアウトの一例を図 5.2.8 に示す。この例では、本体を除くと、運動計測用の光学式カメラと動画撮影用のビデオカメラを別途設置した。また、係留点は水底にあるという想定であるため、曳航台車から曳航用治具を下方に降ろし、係留支点を模型より下に設置している。

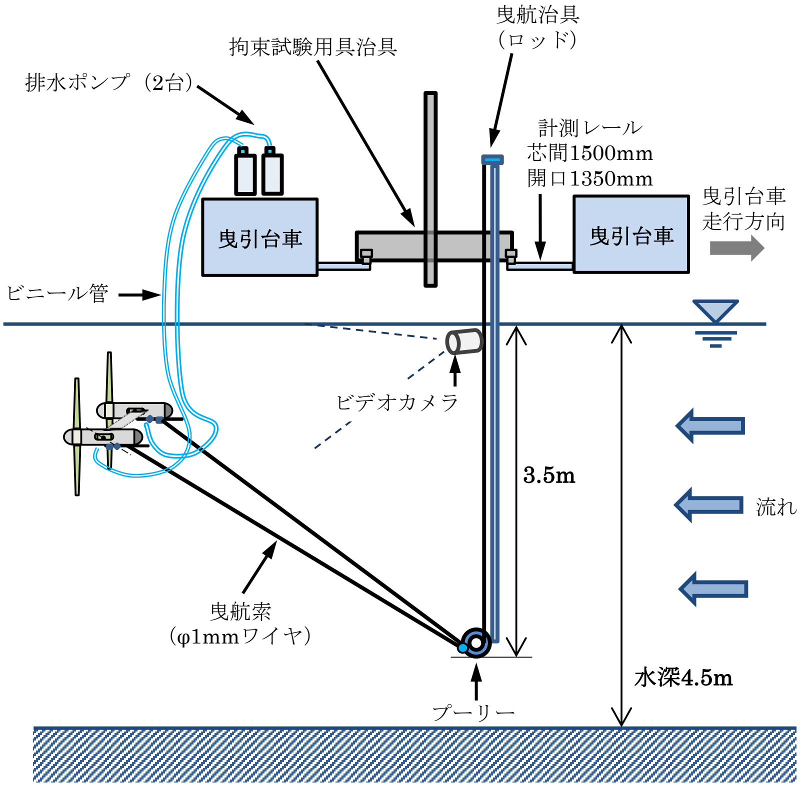


図 5.2.8　水槽試験レイアウトの例
（出典：海上・港湾・航空技術研究所海上技術安全研究所提供）

5.3 垂直軸型

5.3.1 基本メカニズム

(1) ロータ

既に述べたように、風力発電の発電形式はプロペラ式が主流となっており、それに合わせて本書でも同形式に絞った解説を行った。しかし、水車については、垂直軸型水車や抗力型の水車についても実海域試験を含めた検討が行われている。特に、周期的に流れが反転する潮流発電では、あらゆる向きの流れに対応できる垂直軸風車の特徴が有効に働くと期待できる。また、風車と比べると、流体の密度の違いや自重の影響が相対的に小さくなる点もこのような差を生んでいる。

垂直軸型水車は、流れに対し直角方向の回転軸を有する水車である。主に揚力の作用により回転する水車を揚力型水車といい、高い周速度が得られる。ダリウス型などがこれに含まれる。なお、風車におけるダリウス型は、上端下端が回転軸に固定され中央部が膨らんだ型式を指し、直線翼型と区別するが（図 3.1.2 参照）、水車では直線翼型もダリウス型と呼ぶ。本書でもこれに従っている。

一方、主に抗力の作用により回転する水車を抗力型水車といい、サボニウス型などがこれに含まれる。抗力型水車は、高い回転速度を得ることはできないものの、回転力（トルク）が大きいことが利点である。

揚力型水車の動作状況を図 5.3.1 に示す。ブレード断面は翼型のものが多い。ブレードが 360deg 回転するため、流れに対する迎角は大きく変化する。定常回転に達し周速比がある程度大きくなれば、実際のブレードの迎角は小さくなり、翼として効率的に作動する範囲の変動に収まる。しかし、停止時や低回転状態ではブレードが失速して揚力を発生しない。このため、起動時のトルクが小さいことが欠点となっている。また、迎角がある程度変動することが避けられないため、発電効率は水平軸型よりも小さい。

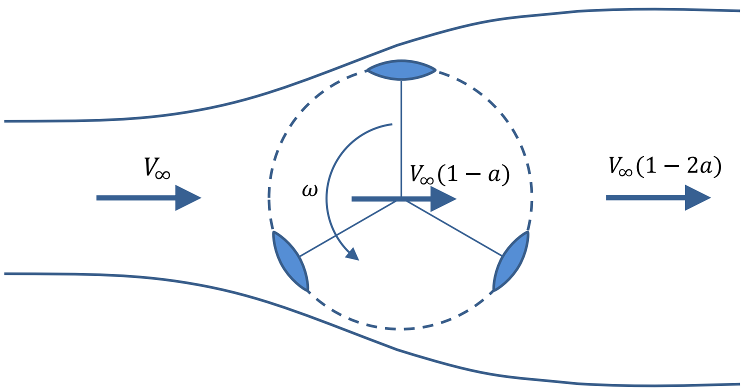


図 5.3.1　揚力型水車の動作状況

抗力型水車について、サボニウス型風車（図 5.3.2）を例にとって考えてみる。サボニウス型風車は、円筒を縦半分に切った形の受風バケットを向かい合わせて中心をずらして取

り付けた形となっている。バケットの凹部と凸部は、ともに風の力を受け抗力を発生するが、抗力係数が異なるため、風車が一方向に回転することになる。物体形状と抗力（係数）の関係を表 5.3.1 に示す。

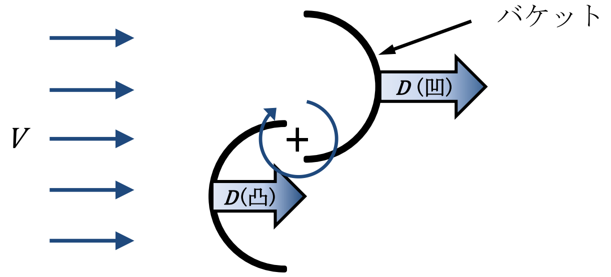
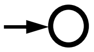
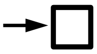
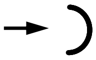
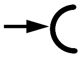
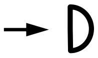
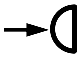
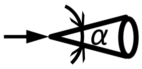


図 5.3.2　サボニウス型水車の原理

（出典：牛山泉、2005 による図を参考に作成）

表 5.3.1　物体形状と抗力係数

物体形状		抗力係数 C_D	レイノルズ数 Re
円　柱		1.2	$10^3 \sim 10^5$
角　柱		2.0	$>10^4$
半円筒（凹）		2.3	$>10^4$
半円筒（凸）		1.2	$>10^4$
楕円柱		0.6	$10^3 \sim 10^5$
半球（凹）		1.33	$>10^4$
半球（凸）		0.34	$>10^4$
円　錐		0.53（$\alpha=60°$） 0.34（$\alpha=30°$）	$>10^4$

（出典：牛山泉、2005 による表を参考に作成）

　バケットに作用する圧力は、流入風速からバケット周速度を引いた相対流速の自乗に比例するため、圧力は回転停止時に大きく、起動トルクを大きくすることができる。逆に、周速比の増加とともに相対流速が小さくなるため、トルクは急速に小さくなる。また、パワーはトルクと回転数の積に比例するため、高速回転ができない抗力型の最大効率は揚力型よりも低くなる。図 5.3.3 は、その関係を概念的に示したものである。垂直軸風車の文献からの引用であるが、垂直軸水車でも同様である。

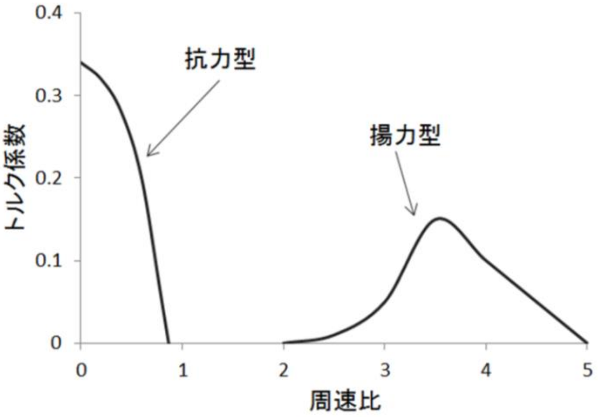


図 5.3.3　揚力型水車と抗力型水車のトルク特性
（出典：牛山泉、2005 による図を参考に作成）

水車の性能を表すパワー係数、スラスト係数、トルク係数の定義は、水平軸型と同一である。周速比も水平軸型と基本的に同一で、ブレードの速度と水車の影響を受けない上流側の風速の比を言う。

ソリディティは定義が異なるため次式に示す。図 5.3.4 に示すように水平軸型水車のソリディティは、回転面の面積に占めるブレードの投影面積の割合であるが、垂直軸型ではブレードが通過する円周に占めるブレード長の比であって、流速方向に投影した面積比ではない。

$$\sigma = \frac{BC}{2\pi R} \tag{5.3.1}$$

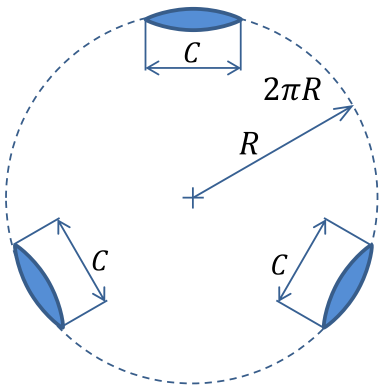


図 5.3.4　垂直軸型水車のソリディティ使用係数の定義

(2) 支持構造に作用する荷重

基本的な支持構造は水平軸水車と変わらない。現段階では、着床式あるいは浮体式による検討が主で、水中浮遊式による計画は無いようである。

5.3.2 数値計算技術

垂直軸型潮流・海流発電装置の設計技術については、概ね水平軸型のものと同様 39 の考え方ができる。すなわち、実機の輸送、設置から運転、メンテナンス等、本体が受けうるあらゆる荷重条件について適切な安全性を確保し、かつコストを低減していくということである。

しかし、垂直軸型では、流れに対するブレードの迎角が回転角によって変化する。また、下流側のブレードは、上流側ブレードの後流の影響を受ける。したがって、プロペラ型の風車・水車のロータ性能解析で示した翼素運動量理論は、水平軸水車とやや異なるアプローチが必要になる。また、CFD 解析においても、迎角が非定常に変化する影響や複雑な後流中におけるブレードの力を適切に考慮することが必要になる。

これらの手法は複雑になるため、ここでは参考に垂直軸型の翼素運動量理論を示すに留める。

参考　垂直軸型の翼素運動量理論

水平軸水車・風車では、ブレードへの流入速度と迎角は一定であったが、垂直軸水車では、ブレードの位置（回転角）によって個々のブレードへの流入速度と迎角が異なる値を取る。したがって、水平軸型に適用した翼素運動量理論（3.1.1 項参照）とは、やや異なる扱いが必要である。

1. 翼素理論

図参-1 によって説明する。アーム半径を R 、回転角速度を ω とする。また、一様流の流速を V_∞ 、ロータ流入速度を V_m 、回転角を ϕ 、ブレードへの相対流入速度を V_R 、相対流入速度と周方向とのなす角を β とする。

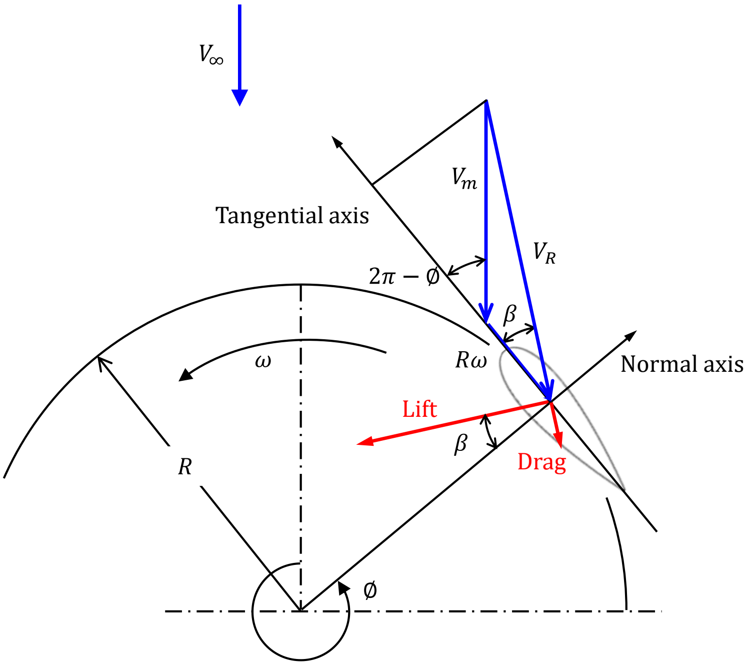


図 参-1　垂直軸水車ブレードへの流れ

ここで、幾何学的な関係によって、ブレードへの相対流入速度 V_R の周方向成分 V_t ならびに法線方向成分 V_n は次のようになる。

$$V_t = R\omega - V_m \sin\phi \qquad \text{（参-1）}$$

$$V_n = V_m \cos\phi \qquad \text{（参-2）}$$

この両者より、相対流入速度と周方向のなす角 β は次のように表現できる。

$$\beta = \tan^{-1}\left(\frac{V_n}{V_t}\right) \quad (参\text{-}3)$$

$$\beta = \tan^{-1}\left[\frac{\cos\phi}{\left(\frac{R\omega}{V_m}\right) - \sin\phi}\right] \quad (参\text{-}4)$$

また、相対流入速度V_Rは次のようになる。ここで、一様流V_∞からの流場の減速を考慮した周速比λ^*を導入することも可能である。

$$\begin{aligned} V_R &= \sqrt{V_t^2 + V_n^2} \\ &= (1-a)V_\infty\left(\left(\frac{R\omega}{V_m}\right)^2 - 2\left(\frac{R\omega}{V_m}\right)\sin\phi + 1\right)^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (参\text{-}5)$$

$$\lambda^* = \frac{\lambda}{(1-a)} \quad (参\text{-}6)$$

$$V_R = (1-a)V_\infty(\lambda^{*2} - 2\lambda^*\sin\phi + 1)^{\frac{1}{2}} \quad (参\text{-}7)$$

$$\overline{V_R} = (1-a)(\lambda^{*2} - 2\lambda^*\sin\phi + 1)^{\frac{1}{2}} \quad (参\text{-}8)$$

ブレードへの相対流入速度から、揚力Lおよび抗力Dを次式で定義できる。ここでは簡単のために直線翼を想定し、翼のコード長をc、翼長をlとする。また、揚力係数C_L、ならびに抗力係数C_Dは、βを用いて定義するが、ブレードが初期取付角を有している場合は実効迎角で定義する。

$$L = \frac{1}{2}\rho c l V_R^2 C_L \quad (参\text{-}9)$$

$$D = \frac{1}{2}\rho c l V_R^2 C_D \quad (参\text{-}10)$$

また、ブレードに作用する力を周方向成分F_tと法線方向成分F_nに分解すると、周方向と流入速度のなす角βを用いて次のように示すことができる。

$$F_t = L\sin\beta - D\cos\beta \quad (参\text{-}11)$$

$$F_n = -L\cos\beta - D\sin\beta \quad (参\text{-}12)$$

以上で求めた周方向、接線方向の力から、一様流の軸方向の力δF_Xと軸に直交する方向の力δF_Yを一様流とアームのなす角ϕを用いて表現できる。

$$\delta F_X = F_t \sin\phi - F_n \cos\phi \qquad (参\text{-}13)$$

$$\delta F_Y = -F_t \cos\phi - F_n \sin\phi \qquad (参\text{-}14)$$

δF_Xをロータの周に沿って積分し、平均値を求め、かつブレード数nを掛け合わせることで、水車抗力F_Xが求められる。

$$F_X = \frac{n}{2\pi}\int_0^{2\pi}(F_t \sin\phi - F_n \cos\phi)d\phi \qquad (参\text{-}15)$$

一様流方向のロータの投影面積をAとして抗力係数C_{FX}を定義すると、C_{FX}は次のように整理することができる。

$$F_X = \frac{1}{2}\rho V_\infty^2 A C_{FX} \qquad (参\text{-}16)$$

$$C_{FX} = \frac{nc}{4\pi R}\int_0^{2\pi}\overline{V_R^2}((C_L \sin\beta - C_D \cos\beta)\sin\phi + (C_L \cos\beta + C_D \sin\beta)\cos\phi)d\phi \quad (参\text{-}17)$$

後に述べる運動量理論から導かれるC_{FX}に関する式と上式を連立させることで、流速の速度低減率を算出し、水車に作用する力やパワーを導出することが可能となる。

次に、周方向の力F_tとアーム半径Rによって、ロータに作用するトルクQは次式に示される。

$$Q = \frac{nR}{2\pi}\int_0^{2\pi}(L\sin\beta - D\cos\beta)d\phi \qquad (参\text{-}18)$$

これを用いて、パワーPやパワー係数C_pとトルク係数C_qの関係を以下のように導出できる。

$$C_q = \frac{Q}{\frac{1}{2}\rho S V_\infty^2 R} \qquad (参\text{-}19)$$

$$P = \frac{1}{2}\rho V_\infty^3 A C_p \qquad (参\text{-}20)$$

$$P = Q\omega$$

$$= \frac{1}{2}\rho V_\infty^2 ARC_q \cdot \omega$$

$$= \frac{1}{2}\rho V_{\infty}^{3} A\left(\frac{R\omega}{V_{\infty}} C_q\right) \tag{参-21}$$

$$C_p = \lambda C_q \tag{参-22}$$

2. 運動量理論

3.1.1 項で紹介した運動量理論は水平軸風車を想定したもので、単一流管理論（SST：Single Streamtube Theory）と呼ばれている。これは、風車（水平軸水車も同様）を図参-2 のように作動円盤と見なし、風車前後の流れ場を一つの流管として考え、この流管の中でのエネルギー収支から風車の流体力学特性を求める方法である。

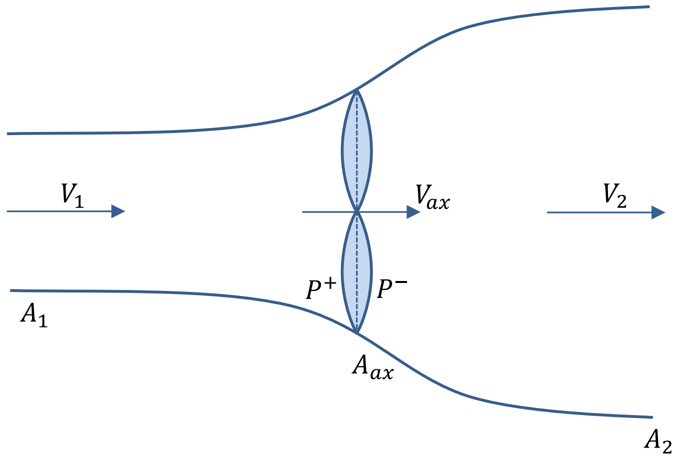


図 参-2　作動円盤に流入する流れのイメージ（再掲）

3.1.1 項で述べたように、単一流管理論から抗力の式は以下のように導かれ、上に述べた翼素理論の式とこれを連立させることで、流体力学特性を求めることができる。なお、a は軸方向流速の誘導係数（induction factor、速度低減率）である。

$$F_x = 4a(1-a)\frac{1}{2}\rho A V_\infty^2 \qquad (参\text{-}23)$$

一方、先に述べたように、垂直軸水車はブレードの位置によって流入速度と迎角が変化する。また、下流側のブレードは上流側のブレード後流の影響を受けるため、単一流管理論の適用性は限定的である。そこで、ロータ軸を境界として流れ場を上流と下流に分け、さらに主流と直角方向にも多数の流管を仮定する二重多流管理論（DMST：Double Multiple Stream Tube theory）が開発されている（図参-3）。図中では、流路が 6 本の流管に分けられ、それぞれにアクチュエータが設定されている。アクチュエータとは、ブレードの効果を模擬した平板であり、この作用によって速度 V_∞ の流れが各アクチュエータの位置で V_a になり、さらに後流では V_w まで減速される。通常は、流管の数はより多く設定される。この手法では、単一流管理論よりも精度を向上させることができるが、流管同士の相互影響を考慮できないなど、モデルとして問題点も残っている。

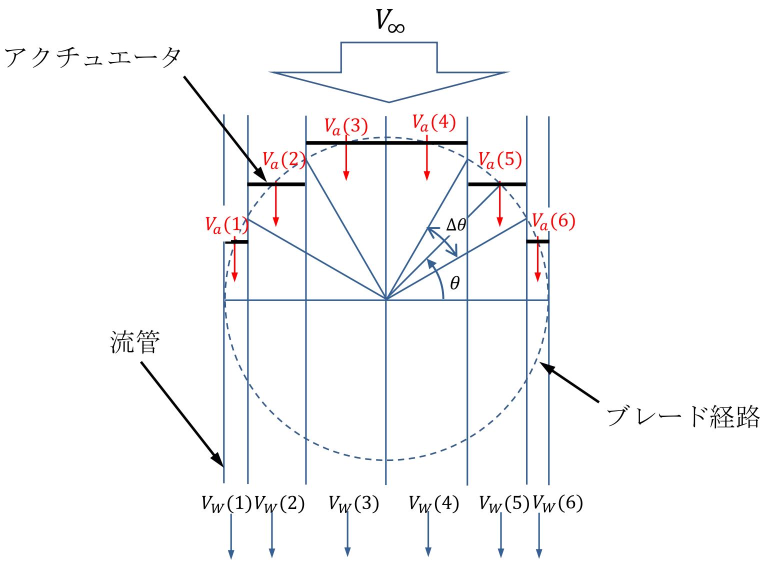


図 参-3　二重多流管理論の概念図（下流側のアクチュエータは省略）

＜参考資料＞

- 新エネルギー・産業技術総合開発機構．NEDO 再生可能エネルギー技術白書．第 2 版．森北出版，2013，672p.
- 国土交通省海上保安庁 第八管区海上保安本部．“日本近海の海流”．海上保安庁 第八管区海上保安本部 海洋情報部．http://www1.kaiho.mlit.go.jp/KAN8/sv/teach/kaisyo/stream4.html，（参照 2021-02-01）.
- 木方靖二，塩野光弘．来島海峡におけるダリウス形水車による潮流発電．電気学会論文誌 D（産業応用部門誌）．1992，Vol.112-D，No.6，p.530-538.
- 経塚雄策．日本における潮流・海流発電の現状と海洋レーダへの期待．応用力学研究所共同利用研究集会．2014.
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構．NEDO 再生可能エネルギー技術白書，総合エネルギー出版社エネルギーフォーラム，2010，650p.
- 居駒知樹，増田光一，中澤那世留，林昌奎，惠藤浩朗，木下健．可変ピッチ垂直軸型水車におけるピッチ角とソリディティ影響．日本船舶海洋工学会春季講演会論文．2014，第 18 号，p.323-324.
- Sun,Huihui ; Kyozuka,Yusaku. Experimental Validation and Numerical Simulation Evaluation of a Shrouded Tidal Current Turbine．日本船舶海洋工学会論文集．2012，第 16 号，p.25-32.
- 山口一．日本沿岸域に適した低コスト潮流発電システムの開発．鉄道建設・運輸施設整備支援機構基礎的研究推進制度報告書．2011.
- ANDRITZ HYDRO Hammerfest. “ANDRITZ HYDRO Hammerfest”.ANDRITZ HYDRO Hammerfest. http://www.andritzhydrohammerfest.co.uk/how-does-it-work/ ,(cited 2021-02-01).
- Subsea World News. “Alstom Shows Tidal Stream Power Generation”. Subsea World News. http://subseaworldnews.com/2013/04/18/alstom-shows-tidal-stream-power-generation-video/, (cited 2021-02-010).
- Subsea World News. “Alstom Delivers More Efficient Tidal Turbine”. Subsea World News. http://subseaworldnews.com/2014/10/01/alstom-delivers-more-efficient-tidal-turbine/, (cited 2021-02-01).
- EMEC. “OpenHydro”. http://www.emec.org.uk/about-us/our-tidal-clients/open-hydro/, (cited 2021-02-010).
- 広部智之，林昌奎，丸山康樹．ヨー・ピッチ制御をしない水平軸潮流発電への流れの流入角度影響評価．日本船舶海洋工学会講演会論文集．2014，第 18 号，p.319-321.
- Aqua-RET Project. “Download Images and Illustrations”. Aqua-RET Project. http://www.aquaret.com/images/stories/aquaret/pdf/tsen.pdf , (cited 2021-02-01).
- Albatross Technology LLC. “Albatross Technology LLC”.Albatross Technology LLC. http://www.ja.albatross-technology.com/technology , (cited 2021-02-01).

- Hydro Review ウェブサイト https://www.hydroreview.com/world-regions/elements-of-success-in-tidal-energy-development/#gref, (cited 2021-02-01).
- Tidetec ウェブサイト. https://tidetec.com/technology-old/what-is-tidal-power/ , (cited 2021-02-01).
- 岡山大学. “環境振動エネルギー学研究室”. 岡山大学. http://www.cc.okayama-u.ac.jp/~hiejima/index.html, （参照 2021-02-01）.
- 九州大学流体科学研究室. “2：カルマン渦”. メカニックパーク. http://www15.tok2.com/home/supercub/mechapark/karuman.html, （参照 2021-02-01）.
- Tidal Energy ウェブサイト. http://www.tidalenergy.eu/sea_gen.html /, (cited 2021-02-01).
- European Marine Energy Center. “Bluewater Energy services”. EMEC. http://www.emec.org.uk/about-us/our-tidal-clients/bluewater-energy-services/, (cited 2021-02-01).
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構. 平成 27 年度 NEDO 新エネルギー成果報告会 海洋・系統分野. 新エネルギー・産業技術総合開発機構. 2015, 208p.
- Renewable Energy Focus ウェブサイト. (cited 2021-2-1) http://www.renewableenergyfocus.com/view/17826/wave-and-tidal-from-spin-out-to-grid/
- Marine Energy Reserch. ”Tidal Energy Devices” Marine Energy Reserch. http://www6.cityu.edu.hk/see_mer/tidal-devices.htm, (cited 2021-02-01).
- Ramboll ウェブサイト. https://uk.ramboll.com/projects/re/tidal_generation_limited, (cited 2021-2-1)
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構. 平成 26 年度 NEDO 新エネルギー成果報告会 海洋エネルギー分野・熱利用分野. 新エネルギー・産業技術総合開発機構. 2014, 266p.
- Carlton,J. Marine Propellers and Propulsion.Elsevier, 2007, 533p.
- ファンクションベイ. “RecurDyn について”. ファンクションベイ. https://www.functionbay.co.jp/product/ , （参照 2021-02-01）.
- 牛山泉. 風力エネルギー読本. オーム社. 2005, 315p.
- 秋元博路, 原豊, 田中謙司, 鵜澤潔. 回転軸傾斜を許容した垂直軸型形式による浮体式洋上風車/海流タービンのコスト低減. 第 34 回風力エネルギー利用シンポジウム. 2012, p.323-326.
- Minesto. “The future of renewable energy”. Minesto.com. http://minesto.com/, (cited 2021-02-01).

6 その他の発電システム

前章まで、洋上風力発電（3 章)、波力発電（4 章)、潮流・海流発電（5 章）を取り上げた。この他、研究開発が比較的進んでいる発電技術として、本章では潮汐発電と海洋温度差発電（OTEC：Ocean Thermal Energy Conversion）を紹介する。

6.1 潮汐発電

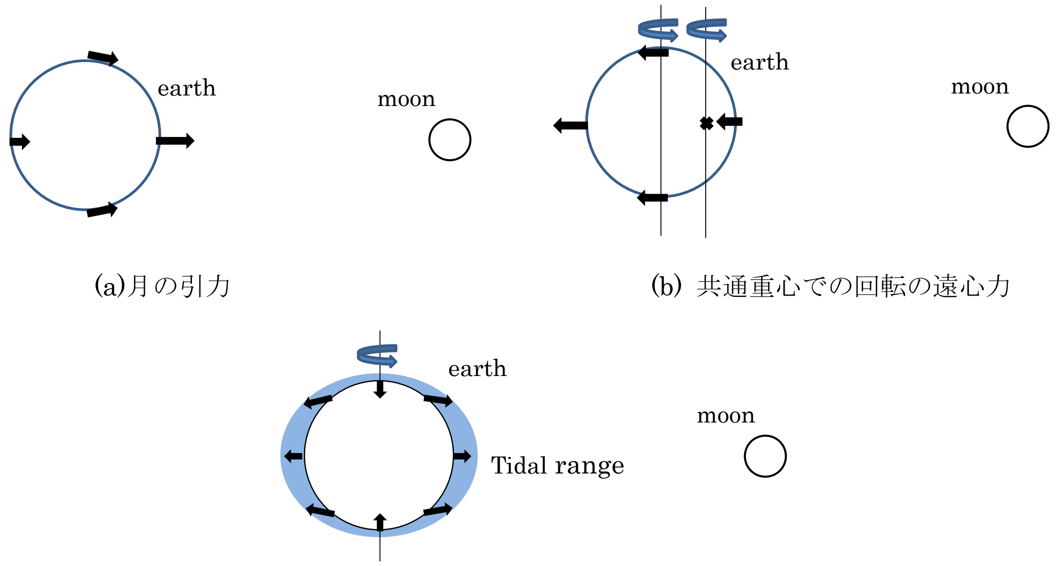
6.1.1 基本メカニズム

(1) 潮汐エネルギーとは

潮汐とは約半日の周期に海面が変動する現象である。この現象の原因は主に月および太陽などの天体と地球との相対運動によって生じる引力と遠心力の合力である潮汐力を用いて説明することができる。

まず月から受ける引力は、物体間の距離の 2 乗に反比例して小さくなるので、図 6.1.1(a)のように地球上では月に面している方が強く引っ張られるが、反対側では弱い。地球と月は引力と遠心力がつり合って安定的に連成運動し、その運動の中心は地球の重心から約 4700km からずれた両天体の共通重心であり、地球も運動している。したがって、地球の重心は共通重心点のまわりで回転運動するが、地球上の他の点についても重心と同じように回転運動するため地球上の点では同図(b)のように全て同じ大きさの遠心力が働くことになる。よって、潮汐を生じさせる力、潮汐力はこの二つの力の合力なので、同図(c)のように作用する。そのため地球上の海面は月に面した側と反対側でも高まることになり、1 日 1 回の自転によって 2 回の満潮を生じることとなる。

ただし、実際には月の軌道面は地球の赤道面に対して約 25deg 傾いており、その影響によって海面の水位は緯度が 25deg 付近で最大になる。また地球が自転する間にも月は地球の周りを移動するので、月に対する周期は長くなる。月による潮汐力が最も大きい半日周期の潮汐を主太陰半日周期分潮（M2）というが、その周期は約 12 時間 25 分である。



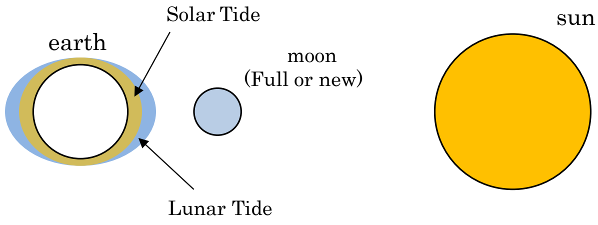
(a)月の引力

(b) 共通重心での回転の遠心力

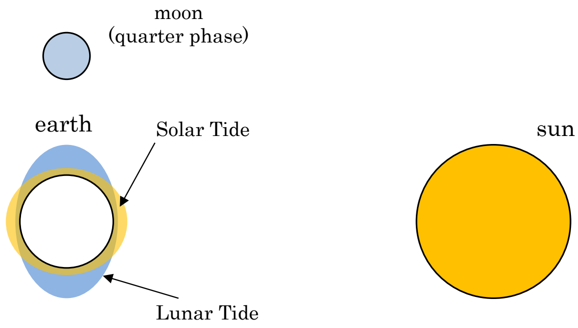
(c) 引力と遠心力の合力

図 6.1.1　月の潮汐力

また、月以外の天体からも潮汐力を受ける。図 6.1.2(a)のように地球に対して月と太陽が一直線上に並ぶと、月と太陽の潮汐力が合わさり、大きな潮汐を生む。このときを大潮といい、一日の満潮と干潮の潮位差が大きくなる。逆に同図(b)のように月と太陽が直角になると、月と太陽の潮汐力が相殺されて小さな潮汐となる。これを小潮といい、一日の満潮と干潮の潮位差が小さくなる。大潮と小潮は新月から次の新月までの間に 2 回ずつ現れる。また、潮汐現象は月と太陽以外にも、金星、火星、木星などの天体からも影響を受ける。太陽系の天体運動は観測によって詳細に調べられており、天体の理論から潮汐力の振幅と周期が計算できる。



(a) 大潮時



(b) 小潮時

図 6.1.2　大潮・小潮時の月と太陽の位置関係

地球表面上の同じ場所で潮の干満が 1 日 2 回現れるのは、地球の自転によって月に近づいたり、離れたりするためであるから、月との距離が自転によってあまり変化することのない地域では、潮位差はほとんどない。一方で、月との距離が最も変化する赤道付近では潮位差は最も大きくなるのであろうか。引力と遠心力の合力の全てが海水を動かす力となり、かつ海水の移動速度が大きくてわずか 6 時間で地球を 1/4 周することができれば、そうなるが、現実にはそのようなことにはならない。海水を動かす力は地球表面に沿う方向でなければならないが、低緯度地域では鉛直方向の成分となり、それは重力に比べてはるかに絶対値が小さい。そのため、いくら大きな水平力が働いても、海水の移動速度はせいぜい時速 10km であり、6 時間で地球 1/4 周分動いて、海水が集中することは不可能である。実際の潮位差は海水の運動による慣性、水深や地形の影響が大きい。日本では気象庁（73 地点）、海上保安庁（20 地点）、国土地理院（25 地点）などが各地で潮位の観測を行っており、観測から、潮汐調和定数として分潮ごとの振幅と位相を公開している。通常、実際の潮位差と潮汐調和定数を用いた計算値の差は非常に小さい。

満潮時と干潮時の潮位差が大きいほど大きな潮汐エネルギーが得られる。全世界の海洋の潮位差を図 6.1.3 に示す。色が青いほど潮位差が小さく、赤いほど大きい。図 6.1.3 から、アジアでは黄海や東シナ海などに面した中国や韓国、南北アメリカ大陸ではカナダ周辺、ヨーロッパ大陸の大西洋岸も、アフリカ大陸の東海岸やオセアニアにも大きな潮位差が見られる。こういった海域では潮汐発電導入のポテンシャルが高い。

一般的に海域の平均潮位差 5m 以上が実用化の目安となっている。諸外国には 10m 以上

の場所が数多く存在するが、日本では図 6.1.4 に示すように平均潮位差の大きい有明湾で 5m 程度であり、日本には 5m 以上の地点は存在しないため、ポテンシャルは低いとされている。

IEA-OES の年次報告書によれば全世界の潮汐エネルギーは 300TWh/year 以上であり、潮流エネルギーはおよそ 800TWh/year 以上と試算されている。実際の発電を考えた場合は、潮位差が大きいことに加えて電力マーケットが近傍に存在することなど適地が限られるため、賦存するエネルギーのうち利用できるエネルギーは限定的となる。

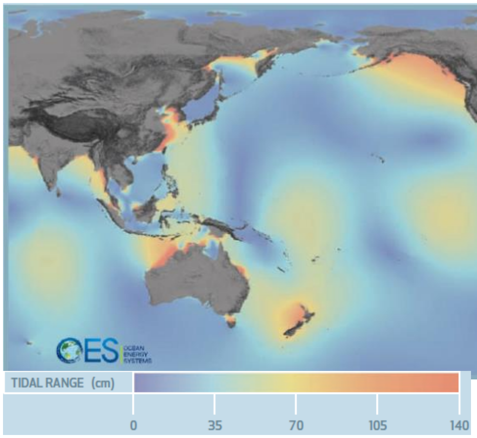


図 6.1.3　世界の潮位分布

（出典：OCEAN ENERGY SYSTEMS、2011）

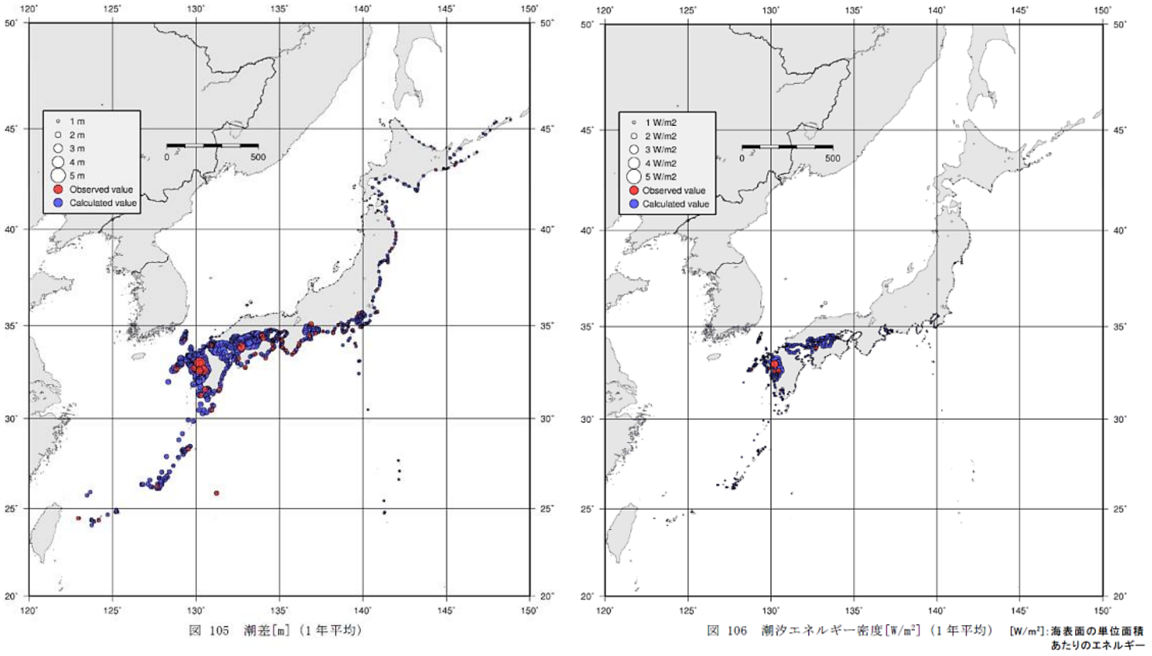


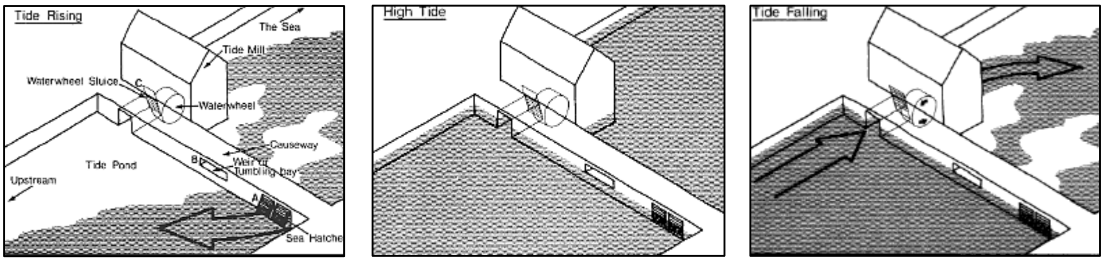
図 6.1.4　日本の潮位差および潮汐エネルギーマップ

（出典：NEDO、2001）

(2) 潮汐エネルギーの利用の歴史

潮汐エネルギーを生活で利用した技術は、古くは 1086 年の英国の最初の土地台帳（domesday book）の中にある潮汐水車と考えられる。潮汐水車は、中世から産業革命までの 800 年間以上は使われており、長い歴史のある海洋エネルギー装置といえる。現在も英国と米国に稼働可能な潮汐水車があり、歴史的建造物として保存されている。

潮汐水車は、外界とダムによって囲まれた潮汐池の間に設置される。一般の河川水車と異なり、水車の前面に設置された水門の開閉によって水量と水車の回転をコントロールする。水車と水門、粉引き器などを覆う小屋が建てられ、潮汐水車小屋と呼ばれる。潮汐エネルギーの利用は、一回の干満について(a)開放（貯水）、(b)閉門、(c)開放（水車駆動）のような手順で行う（図 6.1.5）。(a)潮が満ちると水門を開けて潮汐池に海水を貯め、(b)満潮となった時点で水門を閉じ、(c)その後、外海の水位が十分に低くなったら水門を開けて水車を回し、動力として利用する。潮汐エネルギーは、天体運動によって生じるため天候に関係なく、一定の周期で現れるので予測しやすく、計画が立てやすい点が大きなメリットである。



(a) 開放（貯水）　(b) 閉門　(c) 開放（水車駆動）

図 6.1.5　潮汐水車の運転
（出典：Tide Mill Institute ウェブサイト）

潮汐発電は潮汐の干満を利用するものであるが、干満による海水の流れは非常に遅く、そのままでは利用できない。そのため一般には図 6.1.6 のように堤防を築き、貯水池を作り、堤防の一部に水門を設けて海水の出入りをコントロールすることにより、海と貯水池の間に大きな水位差を作る。この水位差により水の流れを発生させ、それにより発電機を回す。

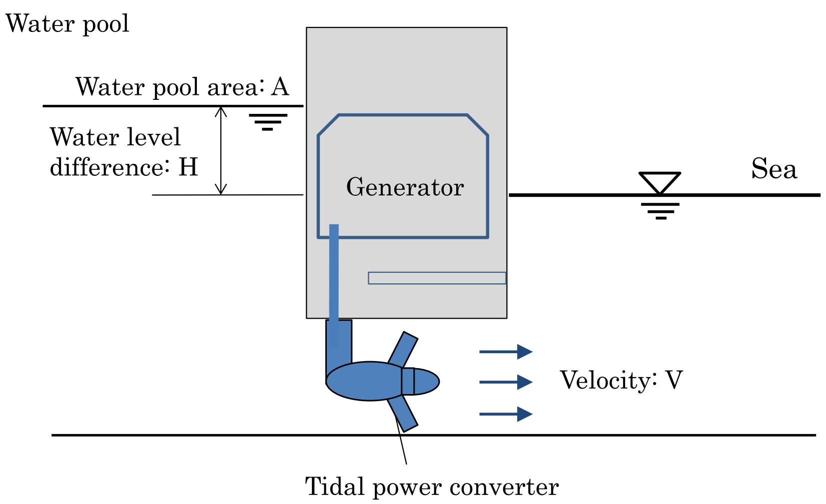


図 6.1.6　潮汐発電システムの例

満潮時に貯水した海水の位置エネルギーを利用するため、潮汐発電が持つポテンシャルエネルギーは、以下のように計算できる。

満潮時の貯水した海水の位置エネルギー E_g は、式（6.1.1）となる

$$E_g = \int A\rho gzdz = \frac{1}{2}\rho gAH^2 \tag{6.1.1}$$

ただし A は貯水池の面積、H は水位差、ρ は海水密度、g は重力加速度である。

この水の位置エネルギーが潮汐発電の発電量に変換されたとすると、1 日に干満は 2 回発生するので、潮汐発電の一日当たりのエネルギーは 2 倍となる。その時の 1 日の平均出力 W_{AVE} は、式（6.1.2）となる。

$$W_{AVE} = \frac{\rho gAH^2}{3600 \times 24} \cong 0.116\,AH^2[W] \tag{6.1.2}$$

実際にはタービンの効率、伝達効率、発電効率などの変換効率 η を考慮し、式（6.1.3）となる。

$$W_{AVE} = 0.116\eta AH^2[W] \tag{6.1.3}$$

潮汐発電所に適地である条件は潮汐の規模、すなわち潮位差が大きいことであり、式（6.1.3）から潮汐発電の発電量は潮位差の 2 乗に比例することがわかる。また、もう一つの条件として地形が挙げられる。入り口が狭く、内部が広い湾に建設することができれば、小さな堤防を作るだけで大量の海水を利用でき、発電所の建設コストは低くなる。

6.1.2 構造形式

潮汐発電の分類には、貯水池の様式と潮位差によって得た位置エネルギーを変換する発電タービンの様式で分けられる。

(1) 貯水池の分類

① 1 貯水池 1 方向発電方式

1 貯水池 1 方向発電方式には満潮時に発電する方法と干潮時に発電する方法の二つの方法がある。韓国の Sihwa Lake Tidal Power Station（始華湖潮汐発電所）は満潮時発電であり、カナダの Annapolis Royal Generating Station は干潮時発電である。

満潮時発電では貯水池側を低水位に保ち、海側が高水位になったら両社の水位差を利用して発電を行う。手順としては下げ潮時には水門を開けており、干潮になったら水門を閉める。その後、満潮になるまで待ち、海と貯水池の水位差が十分大きくなったときに発電機の水路を開き発電する。

干潮時発電では、図 6.1.7 に示すように、上げ潮時に水門を開けて貯水池に海水を入れ、満潮になったら水門を閉める。その後、干潮になるまで待ち、海と貯水池の水位差が十分大きくなったときに発電機の水路を開き発電する。これらの方式では貯水池と海側の水位差を生じる時間などの待機時間が 65%と長く、稼働率が低いことが欠点となっている。

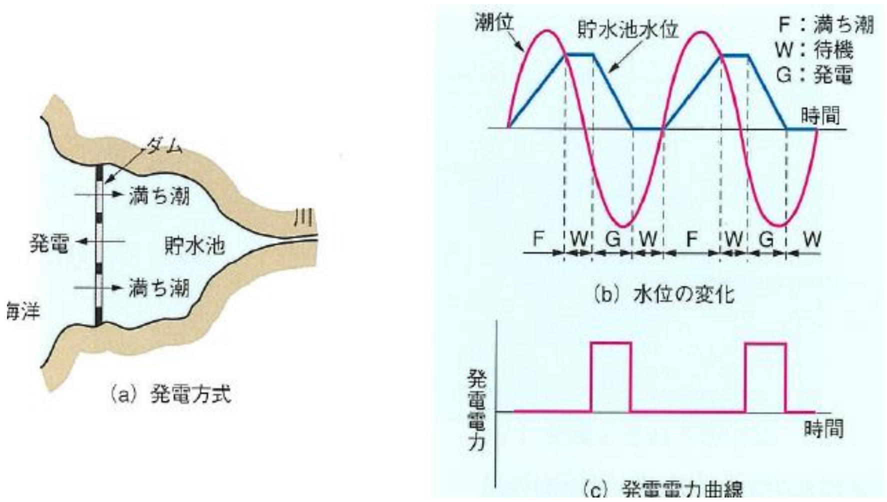


図 6.1.7　1 貯水池 1 方向発電方式
（出典：日本海洋開発建設協会海洋工事技術委員会、2006）

② 1 貯水池 2 方向発電方式

1 貯水池 2 方向発電方式は、1 貯水池 1 方向発電方式の低い稼働率を解決するために考えられた方式である。フランスの Rance Tidal Power Station や中国の Jiangxia Tidal Power Station（江厦潮汐発電所）がこの方式である。図 6.1.8 に示すように、満潮時には海側から貯水池側に、干潮時には貯水池側から海側に水流を作り、双方向に発電する方式である。これにより待機時間が 50%程度までに改善できる。

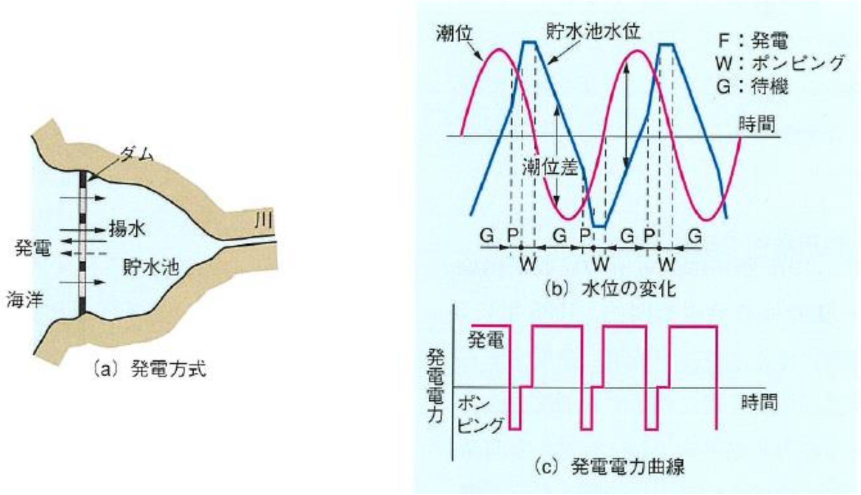


図 6.1.8　1 貯水池 2 方向発電方式
（出典：日本海洋開発建設協会海洋工事技術委員会、2006）

③ 2 貯水池形 1 方向発電方式

1 貯水池方式では稼働時間に限界があるため考えられたのが、図 6.1.9 に示す 2 貯水池方式である。この方式では貯水池を 2 つ作り、一方を高貯水池、もう一方を低貯水池にする。以下のような手順で発電する。

a) 海側の水位が高いときには、高貯水池側の水門を開けて海水を入れる
b) 海側の水位が高貯水池側より下がったら、水門を閉じる
c) 海側の水位が低貯水池側より下がったら、低貯水池側の水門を開けて排水する
d) 海側の水位が低貯水池側より上がったら、低貯水池側の水門を閉める
これを繰り返す。

この方法で海水は、海→高貯水池→低貯水池→海のように循環する。高貯水池と低貯水池には常に水位差があり、連続的な発電が可能となる。しかし、この方式では総発電量は 1 貯水式に比べて低いことが試算されており、また、貯水池を二つ作るための堤防建設費が大きくなるなどの欠点のため、実際に建設するまでには至っていない。

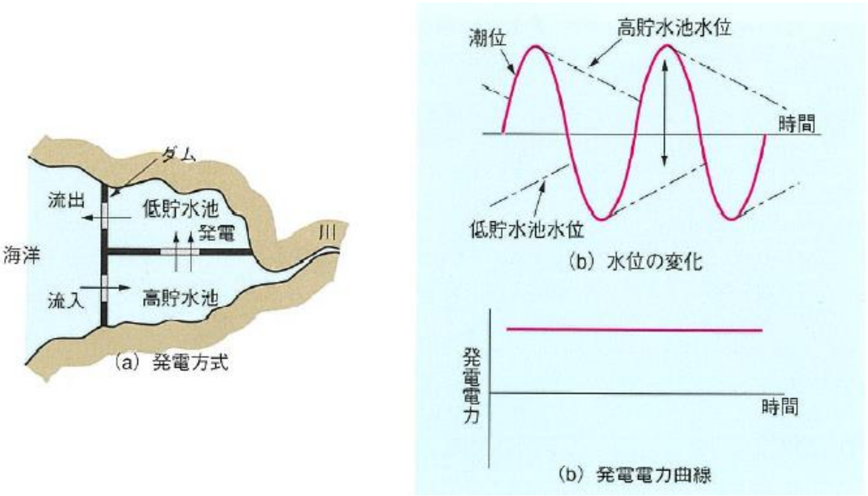


図 6.1.9　2 貯水池形 1 方向発電方式
（出典：日本海洋開発建設協会海洋工事技術委員会、2006）

④ ラグーン

従来の方式では天然の河口を利用し、ダムを建設するものであるが、海水の動きを完全に堰で止めるものである。図 6.1.10 に示すように、防波堤を築いて特定の海域を囲い込み、人工的にラグーン（人工潟）を外海に向けて造成する方式であるため、土地の制限を受けにくく、適切な立地選定や最適な設計を行うことにより、建造コストを低くすることが可能である。発電は 1 貯水池 2 方向発電方式と同様に行うが、ラグーン内の区画が一つだけのものと、幾つかの区画に分けたものが考案されている。複数区画の場合、それらから一つずつ排水されることで、ほとんど連続して発電することができる。現在、建造された実績はないが、英国ウェールズ南部の Swansea Bay で建設計画が立てられている。

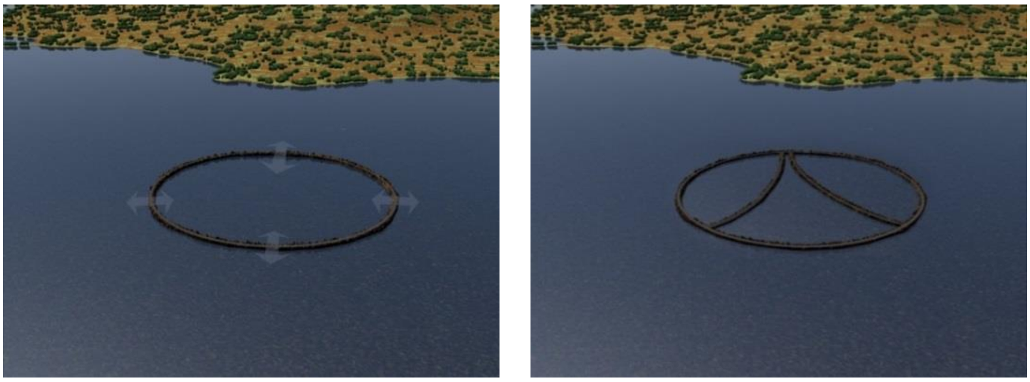


図 6.1.10　ラグーン（人工潟）
（出典：Aqua-RET ウェブサイト）

(2) 発電タービン

かつての潮汐水車で用いられた水車は基本的に河川水車と同じ形式で、潮位差で得られた位置エネルギーを海水の運動エネルギーに変えて水車を回転させるものであった。水車は、脱穀・製粉などの用途で石臼を回すために用いられたので、ゆっくり回転すればよかった。一方、潮汐発電に用いる発電タービンはエネルギー変換効率や、初期費用や維持管理費用などが求められる。近年、いくつかの発電タービンが存在し、ここでは潮汐発電に用いられるものを三つ紹介する。これらのタービンは発電機の容量、収納場所の大きさやメンテナンス性などによって最適なものが選ばれる。

① バルブ式

水車と発電機が一体となったもので、フランスの Rance Tidal Power Station や韓国の始華湖潮汐発電所に使われている。図 6.1.11 に示すように、双方向の流れに対して同じ回転方向になるよう、プロペラ翼は流れに対して根元で取り付け角が変わるピッチコントロール機能をもっている。発電機が水中のためアクセスしにくく、メンテナンス性が悪い。この機構は、発電機部分をモータとして駆動させることにより、海水を貯水池に入れる揚水ポンプとしても利用できる。Rance Tidal Power Station で長年利用された実績もあり、非常に信頼性は高い方式である。

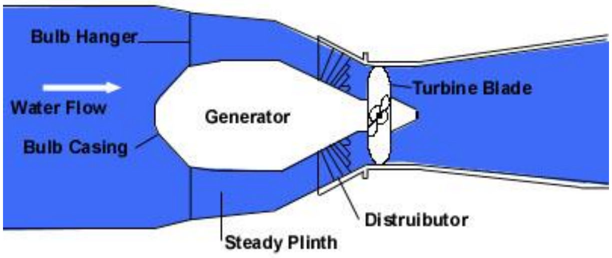


図 6.1.11　バルブ式
（出典：Murdoch University ウェブサイト）

② リム式

リム式（図 6.1.12）はプロペラの外周に取り付けられた電磁石ロータ（electromagnet rotor）と外周ステータ（outer stator）により発電するもので、カナダの Annapolis Royal Generating Station で用いられている。発電機が陸部にあるためバルブ式に比べてメンテナンス性が良いが、固定する発電機の調整が難しく、バルブ式と違い、揚水ポンプとしても利用できない。

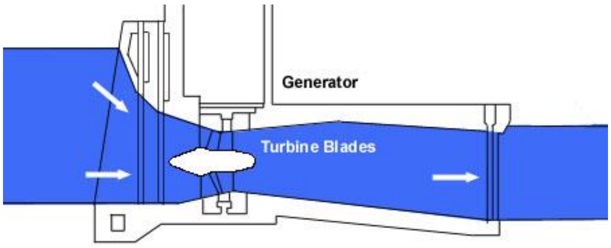


図 6.1.12　リム式
（出典：Murdoch University ウェブサイト）

③ チューブラ式

チューブラ式（図 6.1.13）はタービンと発電機が比較的長いシャフトで連結されたものである。バルブ式、リム式に比べてメンテナンス性が良いが、長いシャフトによる振動が発生しやすい、また、回転を反転させることができず揚水ポンプとしても利用できないなどの欠点もある。

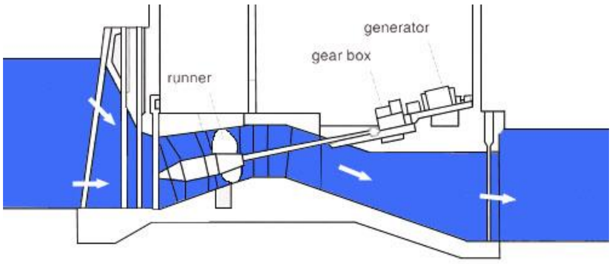


図 6.1.13　チューブラ式
（出典：Murdoch University ウェブサイト）

6.1.3 開発事例

潮汐発電所の歴史は長いため、世界では小規模から大規模まで多くが開発されている。表 6.1.1 は世界の主な潮汐発電所である。その中でも大規模潮汐発電所である Rance Tidal Power Station と始華湖潮汐発電所の二つで 494MW であり、2012 年末の全世界の海洋エネルギー発電所の設備容量 527MW のうち、93%を占めている。

一方、国内では潮位差が最大で有明湾の 5m であり、国外に比べて潮汐エネルギーのポテンシャルは低く、実用化されたものはない。これより、国別で潮汐発電所の詳細を示す。

表 6.1.1　世界の潮汐発電所

発電所名	発電機容量	場所	運用開始年
Rance Tidal Power Station	240MW	Brittany, France	1966
Kislaya Guba Tidal Power Station	0.4MW	Kislaya Guba, Russia	1968
Annapolis Royal Generating Station	20MW	Nova Scotia, Canada	1984
Jiangxia Tidal Power Station	3.9MW	Wuyantou, China	1980
Sihwa Lake Tidal Power Station	254MW	Ansan, Korea	2011

（出典：NEDO、2013 による表を参考に作成）

(1) フランス

潮汐発電所として最も有名なものは長らく世界一の発電量であった Rance Tidal Power Station である（図 6.1.14）。Rance Tidal Power Station はブルターニュ半島の北側、ブルターニュ地域圏イル=エ=ヴィレーヌ県の北端でサン・マロ湾に流れ込むランス川の河口から 4km 上流に位置している。この海域の潮位差は最大 13.5m、平均で 8.5m であり潮汐発電として最適地である。

潮汐発電所に利用する計画は 1923 年に生まれており、長い基礎研究を経て、第二次世界大戦後の 1960 年に長さ 750m、高さ 13m の堤防工事を開始した。1963 年に発電所の建設を開始し、1966 年に完成、送電を開始したのは 1967 年である。工事を円滑に行うために一次的に海側と貯水池側にダムを作り、約 3 年間は完全に陸地化して工事を行った。

堤防の中央部、長さ 330m の部分には 10MW の軸流タービンが 24 基据え付けられ、最大出力が 240MW で、世界初の商用潮汐発電所であり、韓国の始華湖潮汐発電所に抜かれるまで世界最大であった。図 6.1.15 のような閘門、発電機室、固定堰、可動堰に分けられる。発電機室は長さ 390m、幅 33m の RC 構造部で内部は 28 区画に分けられている。Rance Tidal Power Station は 1 貯水 2 方向発電方式であり、干潮時、満潮時の両方で発電するために、直径 5.3m のバルブ式タービンはピッチコントロール可能である。また発電機をモータとして駆動して、海と貯水池の潮位差が小さいときには揚水して潮位差を大きくし、総発電量を大きくなるようにしている。

年間 6 億 kWh、一般家庭の約 25 万世帯分の電力を供給している。建設費用は 6 億 2000 万フランで、これは 2010 年の貨幣価値に換算して 7 億 8800 万ユーロ相当と多額であったが、その費用は長い運用により、すでに回収済みである。潮汐発電所の長期間運転は問題がないことを実証しており、発電コストが安いことも分かった。通常の水力発電と異なって海を利用しているが、その影響による土木施設の更新やタービンなどの交換は行われて

いない。メンテナンスとしては 2 年に 1 回程度、タービン外側の貝などの付着生物を取る。

建設中の 3 年間は完全に海から切り離したため、生態系への影響は少なからずあった。稼働開始とともに海水の交換が始まると、新しい生態系が安定し、数年してヨーロピアンシーバスやコウイカは回復したが、イカナゴやカレイは姿を消してしまった。生態系が戻るまでに 15 年～20 年かかるとの報告もある。

図 6.1.14　Rance Tidal Power Station
（出典：Tidal Energy ウェブサイト）

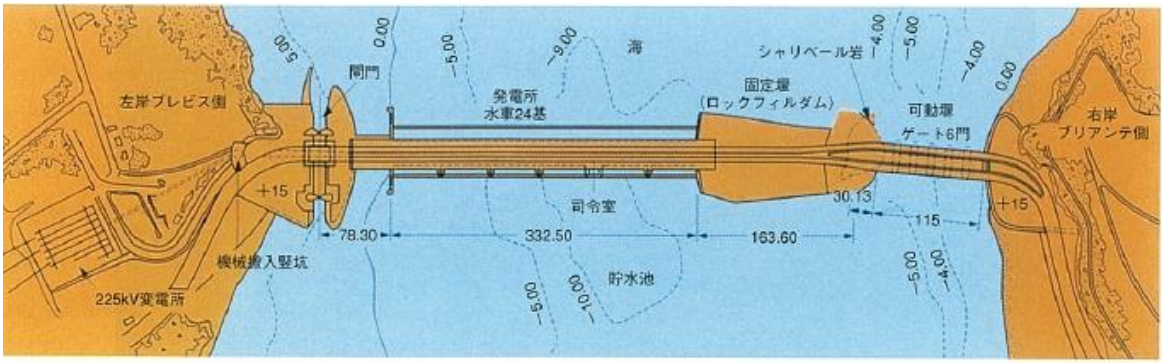


図 6.1.15　Rance Tidal Power Station の配置図
（出典：日本海洋開発建設協会海洋工事技術委員会、2006）

(2) カナダ

Annapolis Royal Generating Station は、世界最大の潮位差約 16m をもつカナダ東部のファンディ湾に位置し、湾の発電開発計画の実証プラントとして建設され、1984 年から運用開始された（図 6.1.16）。発電プラントの主要施設はタービンが組み込まれたコントロールセンター、水位調節用水門、魚道、および送電施設から成る。Annapolis Royal Generating Station は、貯水池 1 方向発電方式で干潮時に発電する。タービンはリム式を採用しており、4 翼で直径 7.6m、重量は 148t である。コントロールセンターで発電された電気は、送電ケーブルにより 80m 離れたサブステーションに送られ、さらに 4km 離れたアナポリ

スロイヤル地区にある既存の変圧ラインを介し、高圧送電システムで地方へ送電される。
設備の管理では防食が重要となる。水門部分にはエポキシ樹脂塗装による防食が施されているが、海水および潮風により腐食環境は悪いため、定期的な補修を行う必要がある。一方、タービンに関しては、電気防食が施されており、腐食はほとんど見られない。

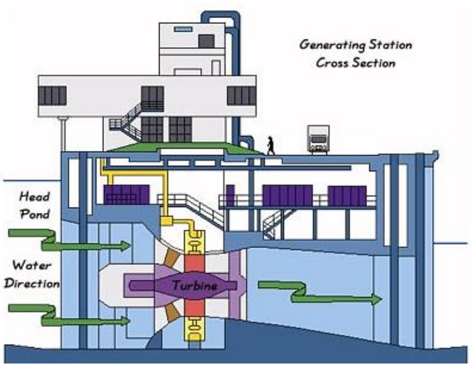


図 6.1.16　Annapolis Royal Generating Station
（出典：West Nova Eco Site ウェブサイト）

(3) 中国

中国の海岸線総延長は長く、豊富な海洋エネルギー資源が存在する。200 カ所近くの湾や河口があり、開発可能な潮汐エネルギーによる発電量は約 20GW とされているが、その多くが福建省、浙江省などのリアス式海岸に集中している。

中国では 1958 年から各地で小型潮汐発電所の建設が始められた。それらの中で、最大出力 40kW の能力を持つ浙江省沙山潮汐発電所は、現在も稼働中である。1970 年代になると、江厦（3900kW）、海山（150kW）、岳浦（75kW）、白沙口（640kW）、瀏河（150kW）などに潮汐発電所が建設された。また 1989 年には、総発電量 1280kW の縦型貫流式発電機を持つ福建省幸福洋潮汐発電所が建設された。

江厦潮汐発電所は、1966 年から始まった干拓事業を 1972 年に計画変更して試験発電所として建設された。1980 年に 500kW の 1 号機の発電を開始し、1985 年に 700kW の 6 号機まで完成した。江厦潮汐発電所の発電様式は、満ち潮時、引き潮時の両方向で発電可能な 1 貯水 2 方向発電方式で、直径 2.5m のバルブ式発電機によって発電総量は 3900kW となっている。ステンレス製タービン以外の設備には普通炭素鋼を使用しているため、腐食による性能低下が発生した。そのため、腐食防止塗料により防食と生物付着防止対策を講じたところ、3～5 年に一度のメンテナンスで、大きなトラブルは発生していない。その他台風襲来時には、運転を停止するなど対策を行っている。

(4) 韓国

韓国の西岸は黄海に面しており、始華湖の位置では潮位差が最大 10.3m、平均潮位差 8.2m あり、潮汐発電に適している。

始華湖潮汐発電所の全景を図 6.1.17 に示す。始華湖は元々、農地と工業用池造成のため

に行われた干拓事業によってできた人工湖であり、長さ 12.7km の堤防で閉め切られた調整池（面積 56.5km^3）を淡水の貯水池として利用する予定であった。ところが 1994 年に堤防が閉め切られて海から切り離されると、2 年後から極端に水質が悪化した。さらに造成した工業団地からの排水には重金属が含まれており、農業用水として使えなくなってしまった。そのため、1997 年からは水門を開放して海水を入れて、汚水を海に出した結果、始華湖の水質は徐々に改善した。既設の水門幅は 50m しかなかったので、発電と水質改善を兼ね備えた計画として、新たに堤防中央付近に潮汐発電所を設け、水の出入りを大幅に増やすことに計画変更した。2003 年には潮汐発電所の正式な計画が成立、建設が始まり、2011 年に一部送電に至った。総工費は 4 億 8700 万米ドルである。1 貯水池 1 方向発電方式で満ち潮の時だけ発電が可能な満潮時発電で、発電タービンはバルブ式を採用している。調整池の水位を-1m から-5m の間でコントロールし、日量 147 百万 m^3 の海水を交流しており、水質改善が進んでいる。発電出力は 25.4MW の発電タービン 10 基で合計 254MW であり、1966 年に完成し、長い間世界一であった Rance Tidal Power Station を抜き、世界最大の潮汐発電所となった。

韓国は始華湖以外にも黄海側に複数の潮汐発電所の候補地を選定しており、今後、実証実験を経て商用運転に進む計画である。始華湖のすぐ北、北朝鮮との海上国境に面する江華島（813MW）や始華湖から南西に 50km ほど離れた加露林湾などの巨大な計画が発表されている。

図 6.1.17　始華湖潮汐発電所
（出典：韓国海洋科学技術院ウェブサイト）

6.2 海洋温度差発電

海洋の表層 100m 程度までの海水には、太陽エネルギーの一部が熱として蓄えられており、低緯度地方ではほぼ年間を通じて 26～30℃程度に保たれている。一方、極地方で冷却された海水は海洋大循環（ocean circulation）に従って低緯度地方へ移動する。移動に従い周辺の海水との間に温度差が生じ、密度が相対的に大きい極地方からの冷たい海水は深層へと沈み込んでいく。この表層水と深層 600～1,000m に存在する 1～7℃程度の深層水を取水し、温度差（図 6.2.1）を利用して発電する。海洋温度差エネルギーは、昼夜の変動がなく比較的安定したエネルギー源であり、季節変動が予測可能であるため、ベース電源として使え、計画的な発電が可能となる。

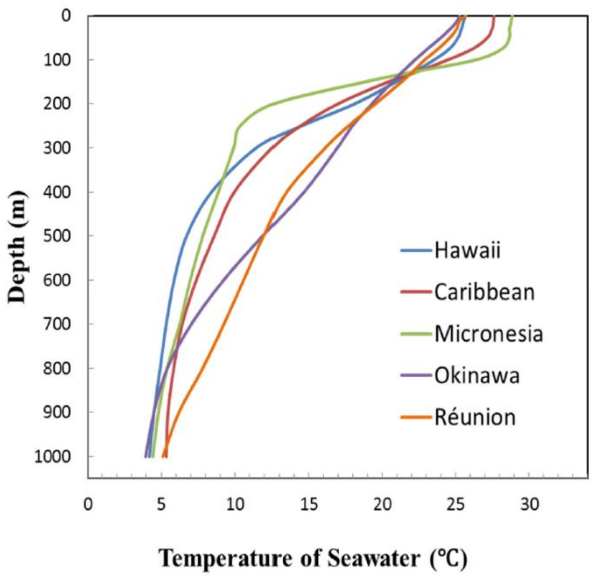


図 6.2.1　海水温の鉛直分布
（出典：上原春男、2013）

6.2.1 技術の歴史

海洋温度差発電は、19 世紀後半から始まり断続的に進歩してきたものである。1881 年、フランスの物理学者 Jacques-Arsène d'Arsonval が海洋の温度エネルギーの開発を提案した。その後、実際には、d'Arsonval の教え子の Georges Claude が、最初の OTEC プラントを 1930 年にキューバに建設した。このシステムは低圧タービンで 22kW の電力を作り出すことに成功した（図 6.2.2）。

また、1933 年～1935 年、Claude はブラジルの沖に停泊させた 10,000 トンの輸送船を使った 1200kW の発電船を建設した（図 6.2.3）。

これらのプラントは正味電力（発電した電力からシステムの動作に必要な電力を差し引いたもの）を発生できるようになる前に、荒天により損傷した。

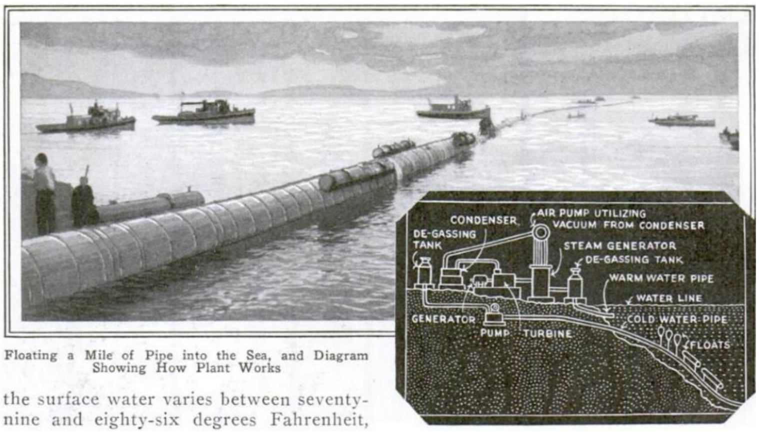


図 6.2.2　冷水取水管の設置状況
（出典：Georges Claude、1930）

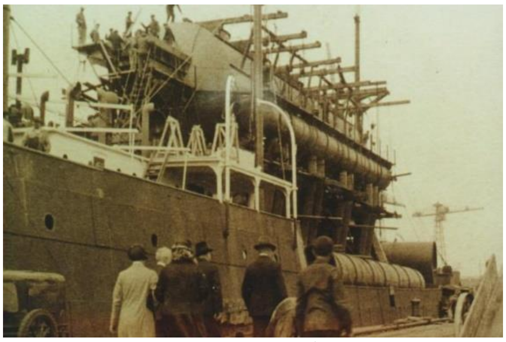


図 6.2.3　1200kW の発電船 LA TUNISE
（出典：Club des Argonautes ウェブサイト）

1956 年、フランスの科学者たちは、コートジボワールのアビジャンに設置するために別の 3MW の OTEC プラントを設計した。しかし、そのプラントは非常に高価なために完成することはなかった。

1962 年、J. Hilbert Anderson と James H. Anderson, Jr.は効率を向上させるために研究を開始した。1967 年にランキンサイクル（Rankine cycle）を改善して、新しい閉サイクル（close cycle）を設計し、効率を向上させた。しかし、エネルギー政策が石炭と原子力に注視されたため、この研究は注目を浴びずに終わった。

米国において 1970 年代は、第四次中東戦争により石油価格が 3 倍に高騰したことで、OTEC 研究開発が活発化した。OTEC システムで 1999 年までに 10,000MW の発電を目標にした法律に、カーター大統領が署名した後、米国連邦政府は 2 億 6000 万米ドルを OTEC 研究に注ぎ、1974 年には ERDA（Energy Research and Development Administration）設立が計画され、NELHA（Natural Energy Laboratory of Hawaii Authority）をハワイ州ハワイ島コナ海岸のケアホレに設置した。ハワイ島は温度差のある表層水と深層水を揚水しやすいため OTEC の最適地である。同年、ロッキード社が、OTEC の研究資金を全米科学財団から受領した。ロッキード社、米海軍、マカイ海洋エンジニアリング、Dillingham 建設等によって、「ミニ OTEC」と呼ばれる世界初の系統接続した OTEC 設備を建設し、1979 年に 3 ヵ月間発電した。

1981 年、ロシアのエンジニアである Alexander Kalina がアンモニア水を使った研究を行

い、OTEC 技術が大きく進歩した。この新しいアンモニア水を用いた手法は、閉サイクルの効率を大いに改善した。

この間、我が国では、1970 年に、東京電力がナウル共和国で 100kW の閉サイクル OTEC プラントを計画し、建設を始めた。1974 年サンシャイン計画で海洋温度差発電の研究が加速され、東京電力のプラントは、1981 年にナウル共和国で稼働、約 120kW の電気を発電した。90kW はプラントの原動源に用いられ、残りの電気は学校等で用いられた。このプラントは本格的に系統接続した世界初 OTEC プラントとなった。また、1982 年には九州電力が徳島県大島郡の徳之島で 50kW の発電に成功している。

1973 年に佐賀大学は海洋温度差発電の実験を開始し、1977 年には 1kW の発電に成功している。その後、1980 年には島根県沖で海上実験を実施し、1985 年に 75kW の発電プラントを完成させた。更に 1995 年には、新しく発明されたウエハラサイクル（Uehara cycle、発明者の上原春男の名をとって名づけられる）をテストする目的で、4.5kW のプラントを稼働させた。このウエハラサイクルは、アンモニア 90%と水 10%の混合物質の作動流体を用い、従来のランキンサイクルにアンモニア蒸気吸収プロセスを加えることにより性能を改善したものである。佐賀大学は、2003 年には伊万里市に基礎実験用 OTEC プラントが完成し、その後も我が国で先導的な研究を行っている。

一方、海外では、1993 年のハワイ州ハワイ島コナ海岸における、開サイクル（open cycle）利用の実証プラント建設（210kW）、1997 年のインドにおける実証プラント建設（1000kW）、2010 年のタヒチにおける 10MW プラントの実証実験などが特筆される。

我が国では、2014 年より NEDO によって沖縄県久米島における 50kW 実証プラントが稼働開始している。

6.2.2 構造形式

海洋温度差発電は、陸上から水上まで様々な形式が存在しており、施設を外殻で分類すると図 6.2.4 のようになる。

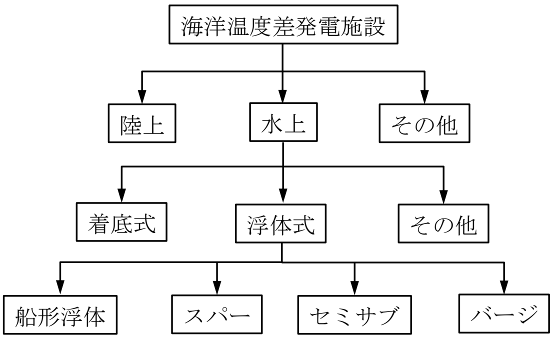


図 6.2.4　海洋温度差発電施設の分類

(1) 設置場所による違い

① 陸上施設

海に近い沿岸に施設を敷設する形式である（図 6.2.5)。海洋設置施設に比較して取水管が長くなるが、建設・保守がしやすく、また海洋深層水の二次利用施設を設けるなど、本項(7)に述べるような複合的な利用を行いやすい。

図 6.2.5　沖縄久米島実証試験設備
（出典：沖縄県海洋温度差発電実証設備ウェブサイト）

② 海洋構造物

a) 着底式

陸地が近く浅い海に着底させて設置する形式。陸上施設と比較して、取水管の距離が短い。また、浮体式に比較し海洋深層水の輸送距離が短い特徴がある。

b) 浮体式

海の上にプラントを浮かべる形式である。世界初の浮体式海洋温度差発電プラントは、貨物船を改造して製作された。規模の大きい海洋温度差発電施設は、表層の海水が入れ替わる必要がある。そのため、潮流がある沖合に浮体式として設置される。

浮体式の主な形式は、船型、スパー型、セミサブ型、バージ型である。

i) 船型

他の浮体式に比較して、移動が容易である。既存の船を改造すれば、費用を安く抑えることができるため、開発初期の実験等に使用された（図 6.2.6)。

図 6.2.6　MINI OTEC
（出典：Cubasolar ウェブサイト）

ii)スパー型

図 6.2.7 にスパー型を示す。水線面が排水量に対して小さいため、揺れにくい特徴がある。また、深層水を汲み上げる距離が他の型式より少し短くなるため、冷水の汲み上げに有利である。一方で高さ方向に長いため、機器の配置に難がある。

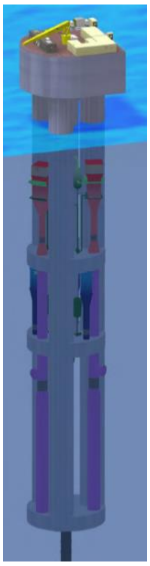


図 6.2.7　Mini Spar OTEC
（出典：Lockheed Martin 社、2011）

iii) セミサブ型

図 6.2.8 にセミサブ型を示す。浮体形状として水線面が小さいことにより、波浪による力を受けにくいので、浮体運動が小さい。床の面積が広いため、機器の配置が自在である。実証実験はなく、計画の段階である。

図 6.2.8　ハワイ OTEC のセミサブ型コンセプト案
（出典： Miller A.等、2012)）

i)　バージ型

排水量を大きくすることで、揺れを小さくすることができる。床の面積が広いため、機器の配置が自在である。図 6.2.9 にバージ型のコンセプト案を示す。

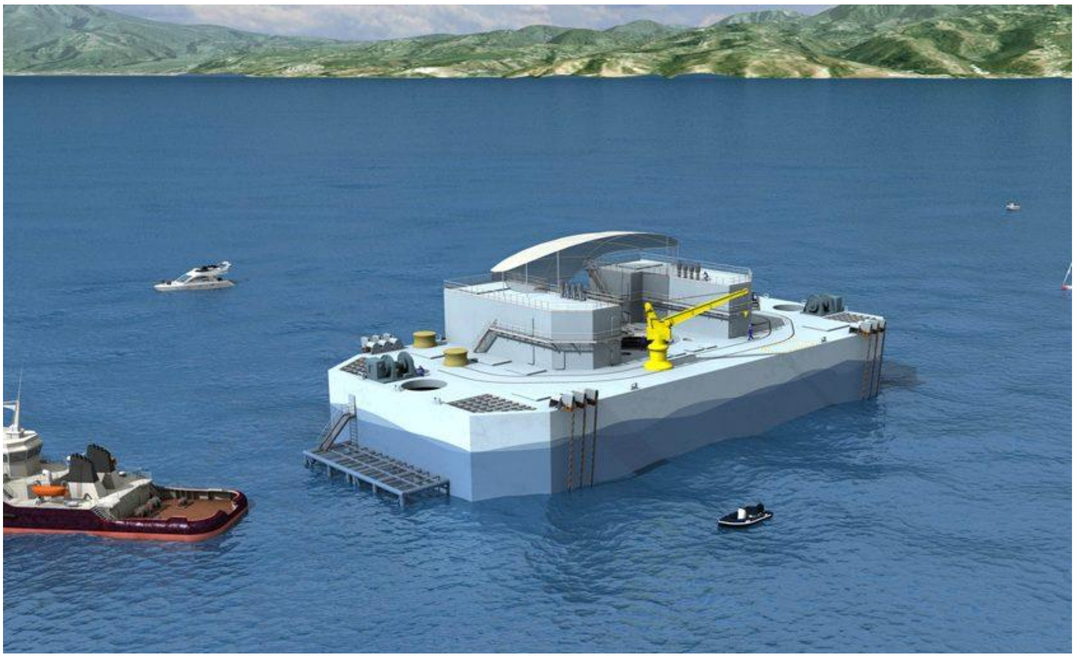


図 6.2.9　NEMO のバージ型コンセプト案
（出典：Tidal Energy Today ウェブサイト）

(2)　取水管

冷水取水管は、深さ 600～1,100m から冷水の吸い上げを行い、管の径は発電量により決

定される。材質として、現在は、HDPE（High Density PolyEthylene、高密度ポリエチレン）や FRP（Fiber-Reinforced Plastics、繊維強化プラスチック）等の軽くて丈夫な素材が主流である。

(3) 浮体施設の留意点

下部に深層水組み上げの長い管があるので、動揺を抑える必要がある。また、取水管の渦励振の抑制が必要である。

(4) 発電機構の違い

① 開サイクル

Georges Claude が考案したサイクルで、図 6.2.10 に示すように蒸発器・凝縮器・タービン・発電機から成るが、構造上作動流体を循環させる必要がないため、作動流体ポンプは存在しない。このシステムでは、蒸発器、タービン、凝縮器内をあらかじめ真空ポンプで真空にしておく。次に、温海水を蒸発器内に導入して蒸発させて水蒸気を得る。この水蒸気を作動流体としてタービンに送り、タービンを回して発電を行う。タービンから出た膨張した水蒸気は凝縮器に入り、冷海水によって冷却され、海に排出される。このように、作動流体である水蒸気はサイクル内を循環しないので開サイクルと呼ばれる。なお、排出した水は飲料水としても使用できる。このサイクルについては、日本ではほとんど研究されていないが、フランス政府は現在でも積極的に研究を行っている。OC-OTEC とも呼ばれる。

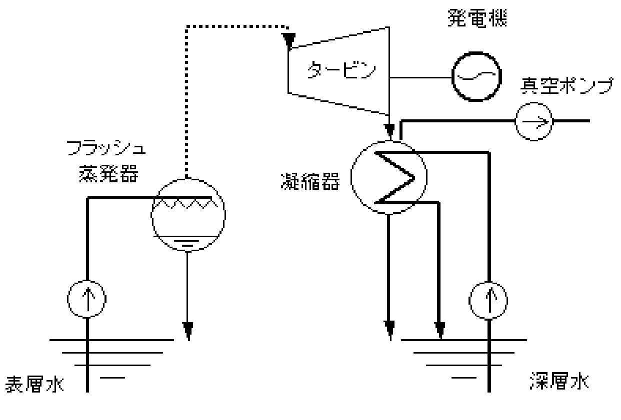


図 6.2.10　開サイクル
（出典：佐賀大学海洋エネルギー研究センターウェブサイト）

上記の他に、佐賀大学 OTEC 実験装置不知火 1 号（1974 年 4 月）や NELHA がハワイ島コナ海岸に建設した OTEC 実験装置（1992～1998 年）がある。

② 閉サイクル

主に蒸発器・凝縮器・タービン・発電機・作動流体ポンプからなる。蒸発器・凝縮器・

タービンはパイプで繋がれていて､そこには作動流体が封入されている｡作動流体は､蒸発器で高温熱源から熱を受け取り､タービンで仕事（発電機を回転させる）を行い､凝縮器で低温熱源へ熱を捨て、再び蒸発器で熱を受け取り、これらの装置を循環する｡このことから､閉サイクルと呼ばれる｡基本的にこのサイクルは火力や原子力発電所と同じであるが､低温熱源として約 5℃の深層水（冷海水）､高温熱源として約 18～30℃の表層水（温海水）を使うことが異なる｡また、作動流体は各熱源の温度が低く､温度差も小さいことから 15～25℃で蒸発する物質を使用する｡この作動流体には、フロン 22（HCFC22）やアンモニアが適当であると言われていたが､現在ではアンモニアと水の混合媒体が有望視されている｡CC-OTEC とも呼ばれ、最近の OTEC では主流である。

以下に、例を挙げる。

・電子技術総合研究所（現在の国立研究開発法人産業技術総合研究所）の ETL-OTEC（1975 年 9 月～）
・米国ロッキード社他の Mini-OTEC［バージ形］（1979 年 8 月）
・米国エネルギー省（DOE）の OTEC-1 実験プラント［バージ形］（1980 年 4 月～1981 年 11 月）
・ナウル共和国の陸上設置型 OTEC プラント［陸上設置型］（1981 年 10 月）
・佐賀大学 OTEC 実験用プラント［陸上設置型］
・インド国立海洋技術研究所の SAGAR-SHAKTI［バージ形］（実験中止）

a)ランキンサイクル（Rankine cycle）

最も基本的な蒸気サイクルで、開発者の名にちなんで名づけられた。図 6.2.11 にランキンサイクルの模式図を示す。これは飽和水を給水ポンプで断熱圧縮してボイラに供給する過程、ボイラで等圧加熱を行い過熱蒸気にする過程、原動機（一般には蒸気タービン）で断熱膨張を行って仕事を発生させる過程、排気が復水器中で等圧冷却されて飽和水となる過程の 4 過程から成る。

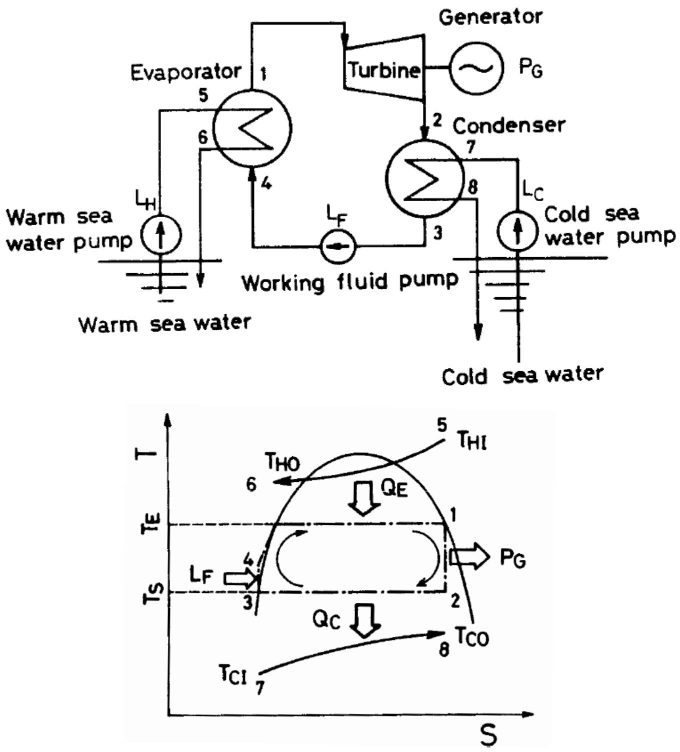


図 6.2.11　ランキンサイクル
（出典：上原春男、中岡勉、1984）

1→2：タービンを回して、温度が下がる。
2→3（7→8）：冷水と熱交換して凝縮する。
3→4：ポンプで圧力を加えて温度を若干上昇させる。
4→1（5→6）：温水と熱交換して蒸発させる。

通常のランキンサイクルでは、乾き蒸気になる温度以上に加熱させるが、海洋温度差発電では、乾き蒸気温度上限までの加熱になる。

b)カリーナサイクル（Kalina cycle）

アンモニアと水の混合物質等、2 種類の物質の混合物を用いたサイクルで、溶解熱を利用し効率を高めたサイクルで図 6.2.12 に示す。開発者 Alexander Kalina の名にちなんで名づけられた。

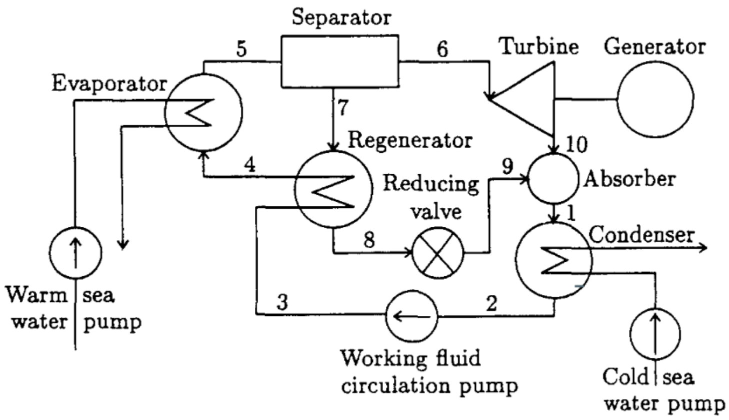


図 6.2.12　カリーナサイクル
（出典：上原春男等、1994）

c) ウエハラサイクル（Uehara cycle）

カリーナサイクルを基に、タービンの途中から一部抽気（bleeding）して凝縮器の負荷を減らすことにより効率を改善したサイクルを、開発者の上原の名をとり「ウエハラサイクル」と呼ぶ。図 6.2.に構成を示す。

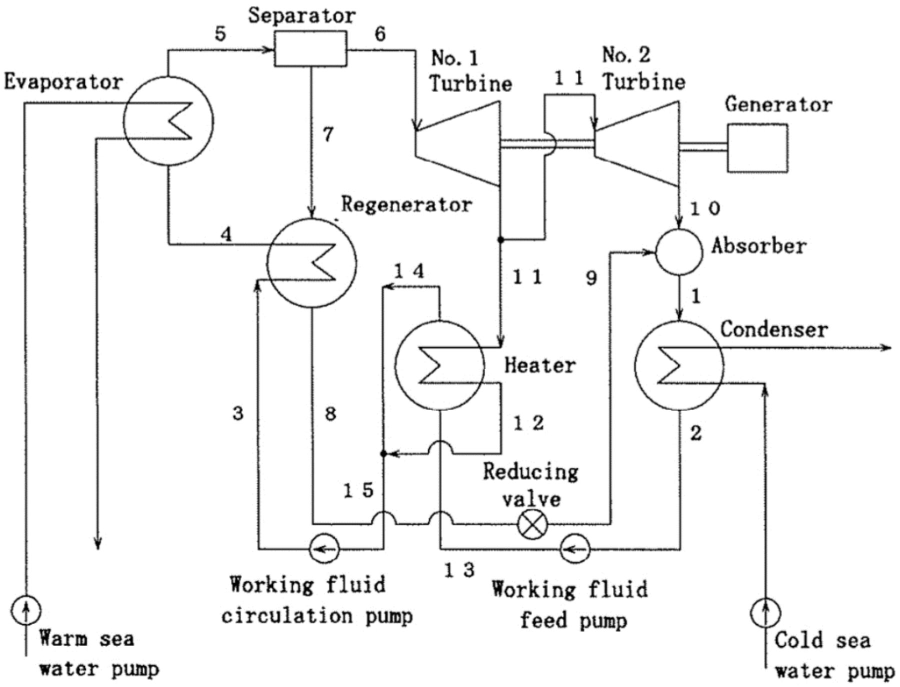


図 6.2.13　ウエハラサイクル
（出典：西田哲也等、2005）

③ ハイブリッドシステム

閉サイクルと開サイクルを組み合わせたシステムであり、図 6.2.に構成を示す。基本構造は閉サイクルであるが、蒸発器に導入する高温熱源が異なる。閉サイクルでは、蒸発器に温海水を直接導入するのに対し、ハイブリッドサイクルでは、一旦開サイクルの蒸発器に温海水を導入し、そこで得られた水蒸気を高温熱源として使う。このことから、閉サイクルに比べ、生物付着等による蒸発器の汚染がなく、性能の低下が防げる。また、開サイクル同様、蒸発器から排出された水は飲料水として使えるため、淡水化技術の応用として考えられている。

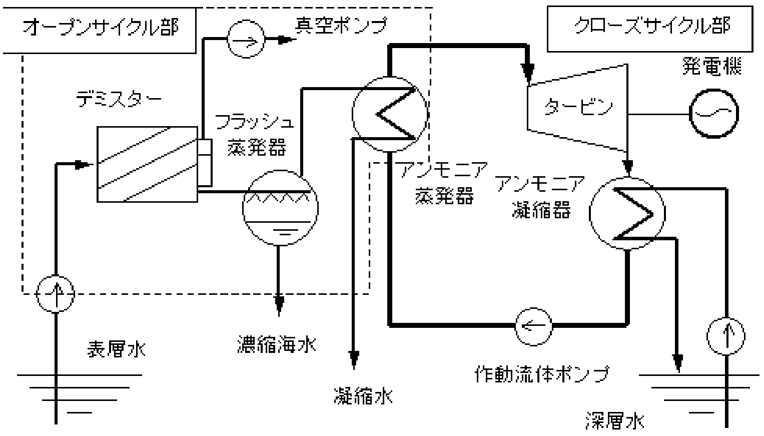


図 6.2.14　ハイブリッドサイクル
（出典：佐賀大学海洋エネルギー研究センターウェブサイト）

(5) 作動流体

エネルギーを投入して温度差を作る冷蔵庫や冷房器具の逆反応であることから、作動流体は、冷蔵庫や冷房器具に使われている流体を用いると効率が良い。開発初期に用いられた流体はフロン 22 やアンモニアである。現在では、規制や扱いやすさの観点から、アンモニアやアンモニアと水の混合物が有望視されている。

(6) 海洋温度差発電の適地

表層と深層の温度差が年平均 20℃以上ある地域が適地である。図 6.2.は表層と深層の温度差の図である。また、排水した冷水により温水の温度が低下しないように、潮流がある海域が望ましい。

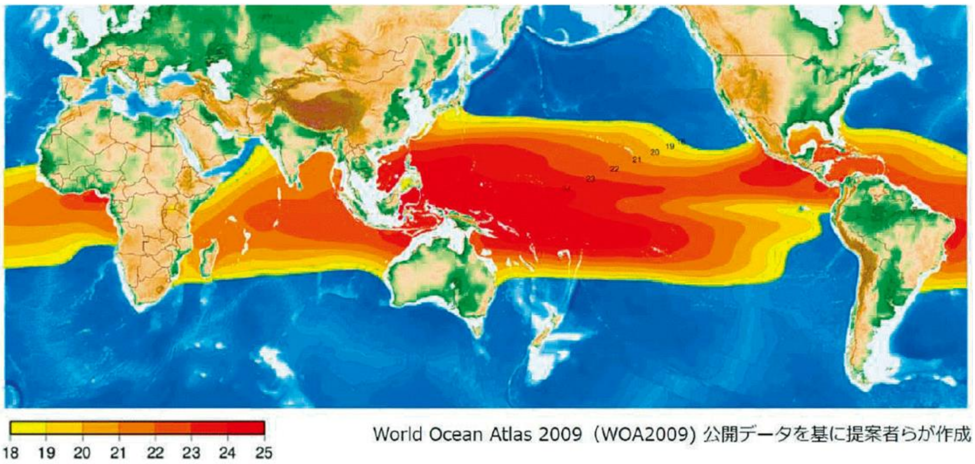


図 6.2.15　表層と深層の温度差（年平均）
（出典：NEDO、2013）

(7) 複合利用

発電に利用した温水および冷水を更に副次的に利用することが期待されている。温水は蒸留水の製造や食塩の生成へ利用することができる。冷水は海洋深層水を栄養源として利用することや冷源としての利用が可能である。

① 温水
- ・淡水化して清水として利用
  - –温水を蒸留し、清水の生成
  - –淡水化した際の濃い塩水を利用しての食塩の生成
- ・水素製造の原料として利用
  - –清水に水酸化ナトリウムを加え、水素の製造を行う。

② 冷水
- ・海洋深層水としての商業利用
  - –食品
  - –飲料水
  - –化粧品
  - –医療品
- ・栄養源
  - –海水浮栄養化
  - –水産資源の養殖
- ・冷源としての利用
  - –ビル冷房
  - –土壌冷却して、寒冷地の野菜等の栽培
- ・希少金属の回収
  - –リチウムの回収

6.2.3 開発事例

(1) 米国

2011 年、ハワイ州カウアイ島南西沖 20km にて 2.5-MW Mini-Spar の実海域実験を実施した。水温の代表値は、温水 25.7℃、冷水 4.1℃、夏季は温水 27.6℃、冷水 4.0℃、冬季は温水 23.1℃、冷水 4.4℃で、発電量は代表値 4.4MW、夏季、5.2MW、冬季、3.1MW である。稼働に必要な電力を引いた正味発電量は、代表値 2.5MW、夏季 3.2MW、冬季 1.3MW である。推定コストは 1 億 7000 万米ドルである。深さ 1,000m から直径 2.5m のパイプを用い、毎秒 10.5 トンの冷水を汲み上げる。100 年再現の海象条件で、6.9deg のピッチ、2.3m のヒーブ運動が見込まれる。

(2) フランス

フランスでは、政府主導で海洋温度差発電の推進を行っている。

欧州における海洋再生可能エネルギー事情を概観すると、波力・海流利用の発電分野では英国が先導的役割を担っている一方、海洋温度差発電の研究ではフランスがリーダー的存在であるといえる。フランスにおける海洋温度差発電研究の歴史は大変古く、何より 1881 年に世界で最初に海洋温度差発電を考案したことに始まる。1950 年以降、フランスでも石油価格が比較的安価であったことで研究開発は沈静化していたが、近年の地球温暖化問題、石油価格高騰等の影響から、再び海洋温度差発電への関心が高まっており、フランス政府は国を挙げて研究開発を推進している。

近年、フランス政府造船局（DCN：Direction des Constructions Navales）を前身とする DCNS 社が 2015 年までに 10MW 規模の実証機を建設する計画を発表した（図 6.2.)。また、2009 年 4 月には、インド洋の仏領レ・ユニオン島地方政府と研究開発に関する合意を締結し検討を開始すると共に、2010 年からはタヒチ島における実施可能性調査も行っている。特に、このタヒチにおける 5MW 規模の海洋温度差発電には、日本の海洋温度差発電のエンジニアリング会社がフランス政府からの依頼で協力・参画している。

図 6.2.16　フランス DCNS 社の仏領レ・ユニオン島における 10MW OTEC の構想
（出典：DCNS 社ウェブサイト）

(3) 沖縄県久米島

実証プロジェクトの場所は「沖縄県海洋深層水研究所」の中にある。2013 年 4 月には発電能力 50kW の実証試験設備（図 6.2.5）が運転を開始して、海洋温度差発電の中核技術である熱サイクルの効率や熱交換器の性能を中心に検証を進めてきた。

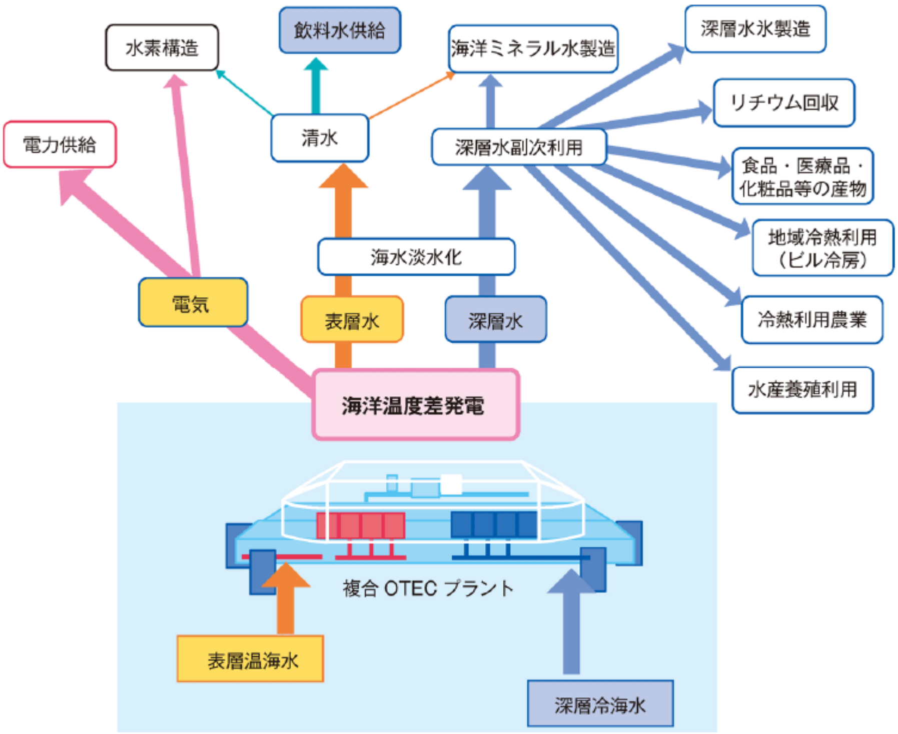


図 6.2.17　久米島における海洋温度差発電の複合利用
（出典：NEDO、2013）

久米島町では 10 年以上にわたり、海洋深層水を中心とした町の活性化を進めており、真謝地区にある沖縄県海洋深層水研究所は 2000 年の開所以来、先頭に立って水産分野、農業分野を中心に様々な複合利用技術を研究開発し、民間企業への技術移転を行ってきた。図 6.2.に複合利用を図示する。

水産分野では、クルマエビの生産に海洋深層水の冷熱性や清浄性を利用することで、種苗生産技術が高度化し、その成果が民間企業に技術移転された。また、海藻類についても、低水温性に加え富栄養性やミネラル特性を利用した種苗生産および陸上養殖技術の開発等の研究に取り組んできた結果、夏季の高水温時の安定生産が困難であったクビレヅタ（海ブドウ）の生産に海洋深層水を利用して水温調整を行うことで安定生産を可能にした。また、海洋深層水に含まれる栄養塩を利用した養殖技術についても検討を重ね、その結果久米島内の企業が 2004 年から養殖・加工販売を開始し、久米島の特産品として高い評価を得ている。

農業分野では、夏場に栽培が困難であるホウレンソウなどの葉もの野菜について海洋深層水の冷熱を利用した根域冷却栽培を行うことで、年間を通じた安定生産に向けた開発を進めてきた。2010 年 12 月には農業従事者や農業に関心のある島民を中心に「久米島海洋深層水農業利用研究会」が発足し、海洋深層水を利用した農業の実用化に向けて動き始めている。海洋深層水の冷熱を利用した農業の進展によって、夏場における農業生産が可能となり、島の経済に貢献することが期待されている。

＜参考資料＞

- Ocean Energy Systems. An International Vision for Ocean Energy .Ocean Energy Systems. 2012, 20p.
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構．風力等自然エネルギー技術研究開発／洋上風力発電等技術研究開発／海洋エネルギーポテンシャルの把握に係る業務 平成 22 年度成果報告書．新エネルギー・産業技術総合開発機構，2011，91p.
- Tide Mill Institute. “Definition of a Tide Mill”.Tide Mill Institute. https://www.tidemillinstitute.org/definition-of-a-tide-mill/ , (cited 2021-02-010).
- 日本海洋開発建設協会海洋工事技術委員会．21 世紀の海洋エネルギー開発技術．山海堂，2006，276p.
- Aqua-RET Project. “Download Images and Illustrations”. Aqua-RET Project. http://www.aquaret.com/indexea3d.html?option=com_content&id=203&Itemid=344&lang=en , (cited 2021-02-01).
- Murdoch University. “Tidal Barrage & Tidal Turbines” .Murdoch University. http://www.see.murdoch.edu.au/resources/info/Tech/tidal/, (cited 2021-02-01).
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構．NEDO 再生可能エネルギー技術白書．第 2 版．森北出版，2013，672p.
- Tidal Energy. “Tidal Barrages”. Tidal Energy. http://www.tidalenergy.eu/tidal_barrages.html,(cited 2021-02-01).
- West Nova Eco Site team. “Tidal Power”. Annapolis Tidal Generating Station. https://www.collectionscanada.gc.ca/eppp-archive/100/200/301/ic/can_digital_collections/west_nova/tidal.html, (cited 2021-02-01).
- K-wataer. “Sihwa-Lake Tidal Power Plant Projects”. K-water. http://english.kwater.or.kr/eng/busi/project03Page.do?s_mid=1192, (cited 2021-02-01).
- 上原春男．“海洋温度差発電の実用化への期待”．佐賀県建設技術支援機構．https://www.sagacat.or.jp/pdf/25-2_uehara.pdf，（参照 2021-02-01）.
- Claude,Georges. Power from the Sea.Popular Mechanics Magazine. 1930, Vol.54, p.881-888.
- Gauthier,Michel. “OTEC economics and electricity costs: A little of OTEC history”. Retour Club des Argonautes - Dossier Énergie Thermique des Mers. http://www.clubdesargonautes.org/otec/vol/vol11-4-2.htm, (cited 2021-02-01).
- 沖縄県．“沖縄県海洋温度差発電実証設備”．沖縄県海洋温度差発電実証設備ウェブサイト．http://otecokinawa.com，（参照 2021-02-01）.
- Francisco Antonio Ramos García y Ángel. “Electricidad en el océano”. Energía No.29. Cubasolar. (2017)
- Lockheed Martin Corporation, Configuration Report and Development Plan Volume 4 Site Specific Plant.2011,262p.
- Miller A., Rosario T., Ascari M. "Selection and validation of a　minimum-cost cold water

pipe material, configuration, and fabrication method for ocean thermal energy conversion (OTEC) systems", Proceedings of SAMPE, Baltimore, MD, p. 27.(2012)

- Ocean Erergy Europe.
https://www.oceanenergy-europe.eu/ocean-energy/otec/ ,(cited 2021-02-01).
- 佐賀大学海洋エネルギー研究センター．“海洋温度差発電の分類”，佐賀大学海洋エネルギー研究センター．
http://www.ioes.saga-u.ac.jp/jp/ocean_energy/about_otec_0/about_otec_02/, （参照 2021-02-01）.
- 上原春男，中岡勉．プレート式熱交換器を用いた海洋温度差発電システムの研究．日本機械学会論文集（B 編）．1984，50 巻，456 号，p.1955-1962.
- 上原春男，池上康之，福川英紹，宇都満義．カリーナサイクルを用いた海洋温度差発電システムの性能解析．日本機械学会論文集（B 編）．1994，60 巻，578 号，p.3519-3525.
- ACADIMYA ウェブサイト．
http://acadimya.blogspot.com/2013/03/kalina-cycle-power-plant.html , (cited 2021-02-01).
- 西田哲也等．ウエハラサイクルを用いた海洋温度差発電システムに関する研究―アンモニアの質量分率の影響―．日本海水学会誌．第 59 巻第 6 号，2005.
- DCNS. “Energie Thermique des Mers:Le projet ESPADON labellisé”. Mer et Marine.
http://www.meretmarine.com/fr/content/energie-thermique-des-mers-le-projet-espadon-labellise, (cited 2021-02-01).
- Masoud,Sherif; Amer,Maher; Samir,Mohamed. Tidal Power Generation Systems. The American University in Cairo Engineering Department, 2001, 11p.

索引

【和英　五十音順】

アップウィンド（upwind）......55, 58

アレイケーブル（array cable）......95, 101

アンカーハンドリング船（Anchor Handling Vessel,AHV）......113

インピーダンス（impedance）......186, 198

ウィングレット（winglet）......210, 215

ウエーブドラゴン（Wavedragon）......149

ウェザーウィンドウ（weather window）......43

ウエハラサイクル（Uehara cycle）......251, 258

ウェルズタービン（Wells turbine）......145, 151, 152, 154, 181

後ろ曲げダクトブイ型（Backward Bend Duct Buoy,BBDB ）......146

渦励振（Vortex Induced Vibration,VIV）......149, 212, 254

エアギャップ（air gap）......158

英国貿易産業省（Department of Trade and Industry,DTI）......156

HPR 基準（Highly Protected Risks standard）......76

SMB 法（Sverdrup, Munk, Bretschneider method）......26

越波型（overtopping）......144, 149, 151

エネルギー吸収効率（energy absorbing efficiency）......140, 142, 162

エネルギースペクトル（energy spectrum）......9, 20

エネルギーポテンシャル（energy potential）......5

MCP 法（Measure Correlate Predict method）......22

遠隔操作無人潜水機（Remotely Operated Vehicle,ROV）......41,113

オイスター（OYSTER）......149

オイラー（Euler）......35

欧州海洋エネルギーセンター（European Marine Energy Centre,EMEC）......144

オリフィス（orifice）......170, 181

開サイクル（open cycle）......251, 255, 258

回転揺れ（rocking）......91

ガイドベーン（guide vane）......153

海洋温度差発電（Ocean Thermal Energy Conversion,OTEC）......234, 249, 257, 259, 261

海洋大循環（ocean circulation）......249

外周ステータ（outer stator）......243

風見鶏効果（wind vane effect）......58, 214

カットアウト（cut-out）......7, 59

カットイン（cut-in）......7, 8

カテナリ（catenary）......73, 112, 118

索引

可動物体型（moving object）............ 144, 184, 188, 190, 193, 197
稼働率（availability factor)............ 8
カリーナサイクル（Kalina cycle)............ 257
監視制御システム（Supervisory Control And Data Acquisition,SCADA ）............ 106
逆一次信頼性解析法（Inverse First-Order Reliability Method,IFORM)............ 27, 50
キャビテーション（cavitation)............ 154, 206, 208, 210
境界要素法（Boundary Element Method,BEM ）............ 117, 167, 175, 194
極値分布関数（extreme value distribution function)............ 22, 24, 46
キンク（kink）............ 129
緊張係留式（Tension Leg Platform,TLP)............ 73
クーリガン・カーペンター数（Keulegan-Carpenter number）............ 184
屈曲動揺型（attenuator)............ 144, 147, 158, 184, 192
グリーン関数（Green function）............ 168, 194
グンベル分布（Gumbel distribution)............ 22, 24, 25, 46, 47
ケーソン（caisson）............ 70, 91, 178
構造ヘルスモニタリング（Structural Health Monitoring,SHM)............ 106
高波浪時海況（Severe Sea State,SSS)............ 51
コーニング角（corning angle)............ 55, 62
国際エネルギー機関（International Energy Agency,IEA)............ 143
国際電気標準会議（International Electrotechnical Commission,IEC）............ 27, 76
国立再生可能エネルギー研究所（National Renewable Energy Laboratory,NREL）............ 85
固有関数展開法（eigenfunction expansion method）............ 167, 195
コンディション・モニタリング・システム（Condition Monitoring System,CMS ）............ 105
再現期待値（expected value in return period）............ 22, 24, 26
サギング（sagging)............ 139
サクション（suction)............ 81, 113
作動円盤（actuator disk）............ 60, 230
自己昇降式作業台船（Self Elevating Platform,SEP）............ 41
支持構造物（support structure)............ 32, 69, 78, 80, 95, 106, 107, 213, 215
ジャイロモーメント（gyroscopic moment)............ 150
ジャケット（jacket)............ 70, 72, 81, 82, 86, 98, 122
周速比（tip speed ratio）............ 57, 64, 89, 122, 221, 223, 228
出力曲線（power curve）............ 7
シュラウド（shroud）............ 209
衝動タービン（impulse turbine)............ 151, 153, 181
新海況予測システム（Fisheries Research Agency - Regional Ocean Modeling System,FRA-ROMS)............ 14
振動水柱型（Oscillating Water Column,OWC)............ 144, 145, 151, 162, 173
振幅位相制御法（amplitude and phase control method）............ 200

索引

吹送距離（fetch）........20, 25
吹送時間（duration）........20, 25
吹送流（wind current）........13, 27, 38, 39
垂直軸風車（vertical axis wind turbine）........56, 223
水平運動（sway）........91, 176
水平軸風車（horizontal axis wind turbine）........56, 58, 209, 230
数値流体力学（Computational Fluid Dynamics,CFD）........60, 66
ストローク（stroke）........156, 160
ストローハル数（Strouhal number）........122
スパー（spar）........16, 73, 110, 118, 122, 126, 253
スラスト（thrust）........60, 79, 115, 123, 125, 220, 225
スリーブパイプ（sleeve pipe）........98
静穏海象（calm sea）........43
制御ゲイン（control gain）........125
設計荷重ケース（Design Load Case,DLC）........78
設計要件（design requirement）........27, 80
設備利用率（capacity factor）........8, 106, 131
セミサブ（semi-submersible）........73, 110, 118, 122, 126, 159, 253
洗掘（scouring）........83, 84, 87, 96, 107
前後揺れ（surging）........125, 139
総合的安全評価（Formal Safety Assessment,FSA）........94
送電ケーブル（export cable）........95, 101, 128, 143, 246
ソリディティ（solidity）........64, 225
ターミネータ（terminator）........162
ダイナミックリンクライブラリ（Dynamic Link Library,DLL）........170
ダウンウィンド（downwind）........32, 55, 58, 74,
多重極展開法（multipole expansion）........167, 194
縦揺れ（pitching）........125
ダリウス（Darrieus）........207, 223
ダリウス・サボニウス（Darrieus-Savonius）........207
単一流管理論（Single Streamtube Theory,SST）........230
タンデムウェルズタービン（tandem Wells turbine）........143
着床式（bottom-mounted）........41, 55, 68, 70, 78, 80, 90, 106, 122, 131, 206, 213, 215
抽気（bleeding）........258
超音波ドップラー流速計（Acoustic Doppler Current Profiler,ADCP）........35
超過確率（exceedance probability）........43
つるべ（bucket）........150
抵抗制御（reactive control）........200

索引

ディフラクション（diffraction）........ 117, 173, 184, 194
ティルト角（tilt angle)........ 55, 59
電磁石ロータ（electromagnet rotor)........ 243
電場応答高分子型人工筋肉（Electroactive Polymer Artificial Muscle,EPAM)........ 148
動的解析（dynamic analysis)........ 91, 119
トート（tout)........ 112, 113, 118
土地台帳（domesday book)........ 238
ドップラーソーダー（Doppler SOnic Detection And Ranging,Doppler SODAR)........ 30
ドップラーライダー（Doppler Laser Imaging Detection And Ranging,Doppler LIDAR)........ 30
トランジションピース（transition piece)........ 96, 99
トランスデューサ（transducer)........ 35
トランスレータ（translator)........ 158
トリポッド（tripod)........ 81, 82, 84
トルク（torque)........ 58, 60, 115, 153, 191, 214, 220, 223, 229
ナウファス（Nationwide Ocean Wave information network for Ports and HArbourS,NOWPHAS,全国港湾海洋波浪情報網)........ 20
ナセル（nacelle)........ 56, 69, 94, 100, 106, 108, 109, 123, 131
ナビエ・ストークス（Navior-Stokes)........ 65
二重多流管理論（Double Multiple Stream Tube theory,DMST)........ 230
日本海洋データセンター（Japan Oceanographic Data Center,JODC)........ 14
認証機関（certification authority)........ 76, 78, 107
ネガティブ・ダンピング現象（negative damping phenomenon)........ 125
排他的経済水域（Exclusive Economic Zone,EEZ)........ 2, 69
はしけ（barge)........ 41
発電機構（Power Take Off,PTO)........ 139, 144, 150, 169, 184, 188, 190, 197, 210, 221, 255
波力発電装置（Wave Energy Converter,WEC)........ 138, 197
パワーブイ（PowerBuoy)........ 146
PID 制御（Proportional Integral Differential control)........ 125
ヒーブプレート（heave plate)........ 159
ビオ・サバール（Biot-Savart)........ 217
非超過確率（non-exceedance probability)........ 22, 25, 43, 46
ファラデー（Faraday)........ 35, 158
風速階級（wind scale)........ 6, 8, 10
フーチング（footing)........ 91
フォイト・シュナイダー・プロペラ（Voith-Schneider propeller)........ 208
復原性（stability)........ 123
複素共役制御（complex-conjugate control)........ 200
浮体式（floating)........ 6, 32, 59, 68, 73, 109,143, 145,193, 213, 215, 221, 252

フランス政府造船局（Direction des Constructions Navales,DCN）........261
フルード・クリロフ（Froude-Krilov）........117, 173, 185
フルード数（Froude number）........122, 221
ブレード（blade）........9, 41, 55, 88, 100, 106, 108, 115, 122, 123, 124, 153, 208, 215, 219, 223, 227
フレシェ分布（Frechet distribution）........24, 25, 46, 47
プレストレスコンクリート（Pre-stressed Concrete,PC）........74
プロジェクト（project）........7, 72, 76, 109, 261
プロッティング・ポジション公式（plotting position formula）........46
プロトタイプ（prototype）........79, 143, 157
米海軍波力発電装置試験場（US Navy's grid-connected 30 meter Wave Energy Test Site,WETS）......157
閉サイクル（close cycle）........250, 255
並進動揺型（point absorber）........144, 146, 159, 184
べき乗則（power low）........9, 13
ベッツ（Betz）........57, 62
ペラミス（Pelamis）........147, 158
ベルヌーイ（Bernoulli）........61
ホギング（hogging）........139
ポンツーン（pontoon）........110
マイクロスケール（microscale）........10
マッハ数（Mach number）........122
マルチボディダイナミクス（MultiBody Dynamic,MBD）........219
ミスアラインメント（misalignment）........58
メソスケール（mesoscale）........10
モノパイル（monopile）........70, 81, 83, 95, 108, 213
モリソン（Morison）........117, 184, 195
油圧アクチュエータ（hydraulic actuator）........155
油圧トランスミッション（hydrostatic transmission）........156
有義波周期（significant wave period）........19, 24, 26, 44, 172
有義波高（significant wave height）........19, 24, 26, 34, 44, 48, 50, 172
有限差分法（Finite Difference Method,FDM）........169
有限体積法（Finite Volume Method,FVM ）........169
有限要素法（Finite Element Method,FEM）........93, 117, 169
誘導係数（induction factor）........61, 230
誘導速度（induced velocity）........65, 217
揚力線理論（lifting line theory）........217
揚力面理論（lifting surface theory）........217
翼素運動量理論（Blade Element Momentum theory,BEM）........60, 115, 216, 227
翼端損失（blade tip loss）........65

索引

ラグランジュ（Lagrange）...35
ラディエーション（radiation)...117, 173, 185, 194, 198
ランキンサイクル（Rankine cycle)...250, 256
ランプドマス法（lumped mass method）...118, 119, 120
リニアダイレクトドライブ式発電機構（direct-drive linear motor）.................................158
リモートセンシング（remote sensing）...30
流管（stream tube)..60, 230
ルイスフォーム（Lewis Form)...194
レイノルズ数（Reynolds number）..65, 66, 122, 221
レイリー分布（Rayleigh distribution）..6
連成解析（coupled analysis）...85, 92, 120, 218
ローゼンブラット（Rosenblatt）...50
ロータ（rotor)......3, 5, 9, 30, 35, 55, 57, 58, 60, 88, 100, 122, 127, 131, 152, 206, 208, 210, 214, 223, 227
ワイブル分布（Weibull distribution)..7, 12, 24, 25, 46, 47, 49

【英和　アルファベット順】

Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP,超音波ドップラー流速計).................................35
actuator disk (作動円盤)..60
air gap (エアギャップ)...158
amplitude and phase control method (振幅位相制御法)...200
Anchor Handling Vessel (AHV,アンカーハンドリング船)..113
array cable (アレイケーブル)..95
attenuator (屈曲動揺型)...144, 162
availability factor (稼働率)...8
Backward Bend Duct Buoy (BBDB ,後ろ曲げダクトブイ型)..146
barge (はしけ)..41
Bernoulli (ベルヌーイ)..61
Betz (ベッツ)..57
Biot-Savart (ビオ・サバール)...217
blade (ブレード)..9, 55
Blade Element Momentum theory (BEM,翼素運動量理論)...60
blade tip loss (翼端損失)..65
bleeding (抽気)...258
bottom-mounted (着床式)..41
Boundary Element Method (BEM ,境界要素法)..117, 167
bucket (つるべ)..150
caisson (ケーソン)..70
calm sea (静穏海象)...43

索引

capacity factor (設備利用率) 8
catenary (カテナリ) 73, 112
cavitation (キャビテーション) 154
certification authority (認証機関) 76, 79
close cycle (閉サイクル) 250
complex-conjugate control (複素共役制御) 200
Computational Fluid Dynamics (CFD,数値流体力学) 60
Condition Monitoring System (CMS ,コンディション・モニタリング・システム) 105
control gain (制御ゲイン) 125
corning angle (コーニング角) 55
coupled analysis (連成解析) 85
cut-in (カットイン) 7
cut-out (カットアウト) 7
Darrieus (ダリウス) 207
Darrieus-Savonius (ダリウス・サボニウス) 207
Department of Trade and Industry (DTI,英国貿易産業省) 156
Design Load Case (DLC,設計荷重ケース) 78
design requirement (設計要件) 27
diffraction (ディフラクション) 117
direct-drive linear motor (リニアダイレクトドライブ式発電機構) 158
Direction des Constructions Navales (DCN,フランス政府造船局) 261
domesday book (土地台帳) 238
Doppler Laser Imaging Detection And Ranging (Doppler LIDAR,ドップラーライダー) 30
Doppler SOnic Detection And Ranging (Doppler SODAR ,ドップラーソーダー) 30
Double Multiple Stream Tube theory (DMST,二重多流管理論) 230
downwind (ダウンウィンド) 32, 55
duration (吹送時間) 20
dynamic analysis (動的解析) 91
Dynamic Link Library (DLL,ダイナミックリンクライブラリ) 170
eigenfunction expansion method (固有関数展開法) 167
Electroactive Polymer Artificial Muscle (EPAM,電場応答高分子型人工筋肉) 148
electromagnet rotor (電磁石ロータ) 243
energy absorbing efficiency (エネルギー吸収効率) 140
energy potential (エネルギーポテンシャル) 5
energy spectrum (エネルギースペクトル) 9
Euler (オイラー) 35
European Marine Energy Centre (EMEC,欧州海洋エネルギーセンター) 144
exceedance probability (超過確率) 43

索引

Exclusive Economic Zone (EEZ,排他的経済水域) 2, 69

expected value in return period (再現期待値) 22

export cable (送電ケーブル) 95

extreme value distribution function (極値分布関数) 22

Faraday (ファラデー) 35

fetch (吹送距離) 20

Finite Difference Method (FDM,有限差分法) 169

Finite Element Method (FEM,有限要素法) 93

Finite Volume Method (FVM ,有限体積法) 169

Fisheries Research Agency - Regional Ocean Modeling System (FRA-ROMS,新海況予測システム) 14

floating (浮体式) 32

footing (フーチング) 91

Formal Safety Assessment (FSA,総合的安全評価) 94

Frechet distribution (フレシェ分布) 24

Froude number (フルード数) 122

Froude-Krilov (フルード・クリロフ) 117

Green function (グリーン関数) 168, 194

guide vane (ガイドベーン) 153

Gumbel distribution (グンベル分布) 22

gyroscopic moment (ジャイロモーメント) 150

heave plate (ヒーブプレート) 159

Highly Protected Risks standard (HPR 基準) 76

hogging (ホギング) 139

horizontal axis wind turbine (水平軸風車) 56

hydraulic actuator (油圧アクチュエータ) 155

hydrostatic transmission (油圧トランスミッション) 156

impedance (インピーダンス) 186

impulse turbine (衝動タービン) 151

induced velocity (誘導速度) 65

induction factor (誘導係数) 61, 230

International Electrotechnical Commission (IEC,国際電気標準会議) 27

International Energy Agency (IEA,国際エネルギー機関) 143

Inverse First-Order Reliability Method (IFORM,逆一次信頼性解析法) 27

jacket (ジャケット) 70

Japan Oceanographic Data Center (JODC,日本海洋データセンター) 14

Kalina cycle (カリーナサイクル) 257

Keulegan-Carpenter number (クーリガン・カーペンター数) 184

kink (キンク) 129

索引

Lagrange (ラグランジュ) 35
Lewis Form (ルイスフォーム).. 194
lifting line theory (揚力線理論).. 217
lifting surface theory (揚力面理論).. 217
lumped mass method (ランプドマス法) 118
Mach number (マッハ数) 122
Measure Correlate Predict method (MCP 法) 22
mesoscale (メソスケール) 10
microscale (マイクロスケール) 10
misalignment (ミスアラインメント) 58
monopile (モノパイル).. 70
Morison (モリソン).. 117, 195
moving object (可動物体型).. 144
MultiBody Dynamics (MBD,マルチボディダイナミクス).. 219
multipole expansion (多重極展開法).. 167
nacelle (ナセル) 56
National Renewable Energy Laboratory (NREL,国立再生可能エネルギー研究所) 85, 86
Nationwide Ocean Wave information network for Ports and HArbourS (NOWPHAS,
ナウファス,全国港湾海洋波浪情報網) 20
Navior-Stokes (ナビエ・ストークス).. 65
negative damping phenomenon (ネガティブ・ダンピング現象) 125
non-exceedence probability (非超過確率).. 22, 43
ocean circulation (海洋大循環).. 249
Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC,海洋温度差発電) 4, 234
open cycle (開サイクル).. 251
orifice (オリフィス) 170
Oscillating Water Column (OWC,振動水柱型) 144
outer stator (外周ステータ) 243
overtopping (越波型) 144
OYSTER (オイスター) 149
Pelamis (ペラミス).. 147, 158, 192
pitching (縦揺れ) 125
plotting position formula (プロッティング・ポジション公式).. 46
point absorber (並進動揺型).. 144
pontoon (ポンツーン) 110
power curve (出力曲線).. 7
power low (べき乗則) 9
Power Take Off (PTO,発電機構).. 139 ,190

索引

PowerBuoy (パワーブイ)........146
Pre-stressed Concrete (PC,プレストレスコンクリート)........74
project (プロジェクト)........79
Proportional Integral Differential control (PID 制御)........125
prototype (プロトタイプ)........79
radiation (ラディエーション)........117
Rankine cycle (ランキンサイクル)........250, 256
Rayleigh distribution (レイリー分布)........7
reactive control (抵抗制御)........200
remote sensing (リモートセンシング)........30
Remotely Operated Vehicle (ROV,遠隔操作無人潜水機)........41, 113
Reynolds number (レイノルズ数)........66, 122
rocking (回転揺れ)........91
Rosenblatt (ローゼンブラット)........50
rotor (ロータ)........3,55
sagging (サギング)........139
scouring (洗掘)........87
Self Elevating Platform (SEP,自己昇降式作業台船)........41
semi-submersible (セミサブ)........73, 110
Severe Sea State (SSS,高波浪時海況)........51
shroud (シュラウド)........209
significant wave height (有義波高)........19
significant wave period (有義波周期)........19
Single Streamtube Theory (SST,単一流管理論)........230
sleeve pipe (スリーブパイプ)........98
solidity (ソリディティ)........64
spar (スパー)........16, 73, 110
stability (復原性)........123
stream tube (流管)........60
stroke (ストローク)........156
Strouhal number (ストローハル数)........122
Structural Health Monitoring (SHM,構造ヘルスモニタリング)........106
suction (サクション)........113
Supervisory Control And Data Acquisition (SCADA ,監視制御システム)........106
support structure (支持構造物)........32, 80
surging (前後揺れ)........125
Sverdrup, Munk, Bretschneider method (SMB 法)........26
sway (水平運動)........91, 194

tandem Wells turbine (タンデムウェルズタービン)......143
Tension Leg Platform (TLP,緊張係留式)...... 73, 110, 112
terminator (ターミネータ)......162
thrust (スラスト)......60
tilt angle (ティルト角)......55
tip speed ratio (周速比)......57, 122
torque (トルク)......60
tout (トート)......112
transducer (トランスデューサ)......35
transition piece (トランジションピース)......96
translator (トランスレータ)......158
tripod (トリポッド)......82
Uehara cycle (ウエハラサイクル) 251, 258
upwind (アップウィンド)......55
US Navy's grid-connected 30 meter Wave Energy Test Site (WETS,米海軍波力発電装置試験場)......157
vertical axis wind turbine (垂直軸風車)......56
Voith-Schneider propeller (フォイト・シュナイダー・プロペラ)......208
Vortex Induced Vibration (VIV,渦励振)......149, 212
Wave Energy Converter (WEC,波力発電装置)......138
Wavedragon (ウエーブドラゴン)......149
weather window (ウェザーウィンドウ)......43
Weibull distribution (ワイブル分布)......7
Wells turbine (ウェルズタービン) 145, 151
wind current (吹送流) 13
wind scale (風速階級)......6
wind vane effect (風見鶏効果)......58
winglet (ウィングレット)......210

【略語　アルファベット順】

ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler,超音波ドップラー流速計)......35
AHV (Anchor Handling Vessel,アンカーハンドリング船)......113
BBDB (Backward Bend Duct Buoy,後ろ曲げダクトブイ型)...... 146, 164, 168, 170, 175
BEM (Boundary Element Method,境界要素法) 117, 167
BEM (Blade Element Momentum theory,翼素運動量理論)......60
CFD (Computational Fluid Dynamics,数値流体力学) 60, 64, 65, 167, 169, 216, 226
CMS (Condition Monitoring System,コンディション・モニタリング・システム)......105
DCN (Direction des Constructions Navales,フランス政府造船局)......261
DLC (Design Load Case,設計荷重ケース) 78

索引

DLL (Dynamic Link Library,ダイナミックリンクライブラリ)........170
DMST (Double Multiple Stream Tube theory,二重多流管理論)........230
DOL (Deviation of OutLier)........47
Doppler LIDAR (Doppler Laser Imaging Detection And Ranging,ドップラーライダー)........30
Doppler SODAR (Doppler SOnic Detection And Ranging,ドップラーソーダー)........30
DTI (Department of Trade and Industry,英国貿易産業省)........156
EEZ (Exclusive Economic Zone,排他的経済水域)........2,69
EMEC (European Marine Energy Centre,欧州海洋エネルギーセンター)........144, 158, 184, 190
EPAM (Electroactive Polymer Artificial Muscle,電場応答高分子型人工筋肉)........148
FDM (Finite Difference Method,有限差分法)........169
FEM (Finite Element Method,有限要素法)........93, 118, 169, 219
FRA-ROMS (Fisheries Research Agency - Regional Ocean Modeling System,新海況予測システム)....14,
FSA (Formal Safety Assessment,総合的安全評価)........94
FVM (Finite Volume Method,有限体積法)........169
IEA (International Energy Agency,国際エネルギー機関)........121, 143, 237
IEC (International Electrotechnical Commission,国際電気標準会議)........27, 78, 80
IFORM (Inverse First-Order Reliability Method,逆一次信頼性解析法)........27, 50
JADE2 (JApan sea Data assimilation Experiment 2)........14
JCOPE (Japan Coastal Ocean Predictability Experiment,日本沿海予測可能性実験)........16
JODC (Japan Oceanographic Data Center,日本海洋データセンター)........14
MBD (MultiBody Dynamic,マルチボディダイナミクス)........219
NOWPHAS (Nationwide Ocean Wave information network for Ports and HArbourS,
ナウファス,全国港湾海洋波浪情報網)........20
NREL (National Renewable Energy Laboratory,国立再生可能エネルギー研究所)........85, 115, 188
O&M (Operation & Maintenance)........68, 131
OTEC (Ocean Thermal Energy Conversion,海洋温度差発電)........4, 249, 261
OWC (Oscillating Water Column,振動水柱型)........144, 162, 169
PC (Pre-stressed Concrete,プレストレスコンクリート)........74, 81
PTO (Power Take Off,発電機構)........139,190
RAO (Response Amplitude Operator)........172, 190
ROV (Remotely Operated Vehicle,遠隔操作無人潜水機)........41, 107, 113, 130
SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition,監視制御システム)........106, 131
SEP (Self Elevating Platform,自己昇降式作業台船)........41, 84, 102
SHM (Structural Health Monitoring,構造ヘルスモニタリング)........106
SSS (Severe Sea State,高波浪時海況)........51
SST (Single Streamtube Theory,単一流管理論)........230
TLP (Tension Leg Platform,緊張係留式)........73, 110, 112, 113, 118
VIV (Vortex Induced Vibration,渦励振)........149, 212

索引

VLA (Vertical Load Anchor).. 113
WEC (Wave Energy Converter,波力発電装置).. 138
WETS (US Navy's grid-connected 30 meter Wave Energy Test Site,米海軍波力発電装置試験場)....... 157

海洋開発工学概論　海洋再生可能エネルギー開発編　改訂第1版　執筆者一覧

【執筆代表】
井上俊司（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
海洋利用水中技術系長）

【執筆者】五十音順
石田茂資、梅田隼、國分健太郎、谷口友基、中條俊樹、羽田絢、平尾春華、藤原敏文

平成29年度　海洋開発人材育成　海洋開発工学概論　海洋再生可能エネルギー開発編
ワーキンググループ委員一覧（順不同）

【座長】
井 上 俊 司（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
海洋利用水中技術系長）

【委員】
稲 井 康 文（国際石油開発帝石株式会社　技術本部 開発技術ユニット施設グループ　 マネージャー）
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）
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）
宇都宮智昭（九州大学大学院工学研究院　海洋システム工学部門　教授）
西 川 正 夫（東亜建設工業株式会社　土木事業本部　理事）

※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）
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）
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　プロジェクトマネージメント本部　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