

中央大学博士論文

吸収と共振に基づく波力発電の研究

Takashi Kawaguchi

川口 隆

博士（工学）

中央大学大学院  
理工学研究科  
都市人間環境学専攻

平成 30 年度

2019年3月

## 目 次

### 第1章 序論

1.1 本研究の背景 .....	1
1.1.1 地球温暖化に関する特別報告書 .....	1
1.1.2 再生可能エネルギーの主力電源化 .....	1
1.1.3 波力発電の必要性 .....	2
1.2 波力発電の歴史 .....	4
1.2.1 現状認識 .....	4
1.2.2 益田善雄と日本の波力発電 .....	5
1.2.3 Stephan Salter と Salter Duck .....	8
1.2.4 Johannes Falnes の共振制御 .....	11
1.2.5 波力発電の分類と発電原理 .....	18
1.3 本研究の目的と意義 .....	24
1.3.1 Salter・川口の吸収制御 .....	24
1.3.2 吸収と共振に関する仮説 .....	26
1.3.3 本研究の構成 .....	27

### 第2章 波力発電における吸収と共振

2.1 前提条件 .....	29
2.1.1 パワー・テイクオフの条件 .....	29
2.1.2 発電機の条件 .....	30
2.2 前後運動による吸収 .....	33
2.2.1 前後振動体の速度ポテンシャル .....	33
2.2.2 入射波と反射波 .....	34
2.2.3 背面波がない場合の吸収 .....	37

2.2.4	背面波がある場合の吸収 .....	38
2.3	前後運動による共振 .....	40
2.3.1	運動方程式 .....	40
2.3.2	流体力 .....	41
2.3.3	背面波がない場合の共振 .....	42
2.3.4	背面波がある場合の共振 .....	43
2.3.5	前後振動体の吸収と共振 .....	43
2.4	上下運動による吸収 .....	44
2.4.1	上下振動体の形状 .....	44
2.4.2	造波と消波 .....	45
2.4.3	パワー吸収 .....	46
2.5	上下運動による共振 .....	47
2.5.1	運動方程式 .....	47
2.5.2	上下振動体の吸収と共振 .....	49
2.6	仮説の証明：吸収と共振は等価である .....	50
2.6.1	最適速度制御 .....	50
2.6.2	力制御の検討 .....	51
2.6.3	最適制御と力制御の比較 .....	53
2.6.4	機械的共振 .....	55
2.6.5	造波と吸収の関係 .....	56
2.7	制御システムの設計 .....	58
2.7.1	制御アルゴリズム .....	58
2.7.2	係数 $\omega/\bar{A}$ の算定 .....	59
2.7.3	係数 $\omega/\bar{A}$ の近似誤差による影響 .....	60

## 第3章 水槽模型試験

3.1 予備実験.....	63
3.1.1 三角断面浮体 .....	63
3.1.2 円柱浮体.....	64
3.1.3 箱型浮体.....	68
3.2 性能確認実験 .....	69
3.2.1 最適速度制御の確認 .....	69
3.2.2 吸収幅比による性能評価 .....	72
3.2.3 入射角影響の確認 .....	74

## 第4章 実証試験

4.1 基本計画.....	76
4.1.1 浮体および発電機 .....	76
4.1.2 沈降システム .....	80
4.2 設置作業.....	82
4.2.1 本体設置作業 .....	82
4.2.2 陸上機器設置作業 .....	83
4.3 性能運転.....	84
4.3.1 浮体の固有周期 .....	84
4.3.2 最適速度制御と抵抗制御 .....	85
4.3.3 最適速度制御による発電試験 .....	86

第5章 結論.....	98
-------------	----

謝辞 .....	100
参考文献 .....	101
付録 1 波面検出及び遠度制御を用いた無反射造波方式 ...	103
付録 2 大洗(20kW)および大分(1kW) 写真集 .....	119
付録 3 海洋環境への影響評価・分析 .....	125
付録 4 振動水柱型波力発電機の考察 .....	136

# 第1章 序論

## 1.1 研究の背景

### 1.1.1 地球温暖化に関する特別報告書

前代未聞の努力が求められている。2018年10月、韓国の仁川で開催された国連の気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の総会において「1.5°Cの地球温暖化に関する特別報告書」が発表された。世界の平均気温が産業革命前と比べて1.5°C上昇した場合、その影響と負担はこれまでの想定をはるかに超えるものになるだろうと言う。

世界の平均気温はすでに産業革命前から1°C上昇して来た結果、この10年間というもの世界中の国や地域が、記録的な嵐や森林火災、干ばつ、サンゴの白化、熱波、洪水に見舞われてきた。報告書によれば、気温の上昇が1.5°Cに達した場合、状況は大幅に悪化するという。2°Cに及ぶとすれば、さらに深刻な事態が予想される。

報告書は1.5°C上昇を抑えて安定させるためには、2030年までに世界全体の年間の二酸化炭素排出量を約45%削減（2010年比）し、2050年ごろには「実質ゼロ」にするという道筋を示した。2050年ごろに世界の電源構成のうち再生可能エネルギーが70～85%を占め、石炭火力発電をゼロに近づけなければならないとした。（環境省報道発表資料（IPCC）「1.5°C特別報告書」）

### 1.1.2 再生可能エネルギーの主力電源化

現状、太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーが、「主力電源」となるには、まだ多くの課題を抱えているが、今後のエネルギー情勢を考えると、再生可能エネルギーを大量導入していくことは不可欠である。

資源エネルギー庁の「2030年エネルギーミックス必達のための対策～省エネ、再エネ等～」では、2030年度の再生可能エネルギー比率を22～24%と見通しており、この水準を実現し、再生可能エネルギーを主力電源としていくことが表明されている。しかし、2016年度現在では、我が国の電源構成に占める再生可能エネルギー比率は約15%となっており、ドイツやイギリスといった諸外国と比べて、低い水準になっている。

太陽光や風力といった再生可能エネルギーの多くは、発電量が季節や天候に

左右されることが多く、需要と供給のバランスが崩れると、大規模な停電などが発生するおそれがある。この中で、再生可能エネルギー比率を22~24%にするためにどうすればいいのか、太陽光、風力、地熱、水力、バイオマス等、買取価格が決まっているものだけでなく、波力、潮流、潮汐等、あらゆる可能性を拓いてゆくことが急務になっていると言える。

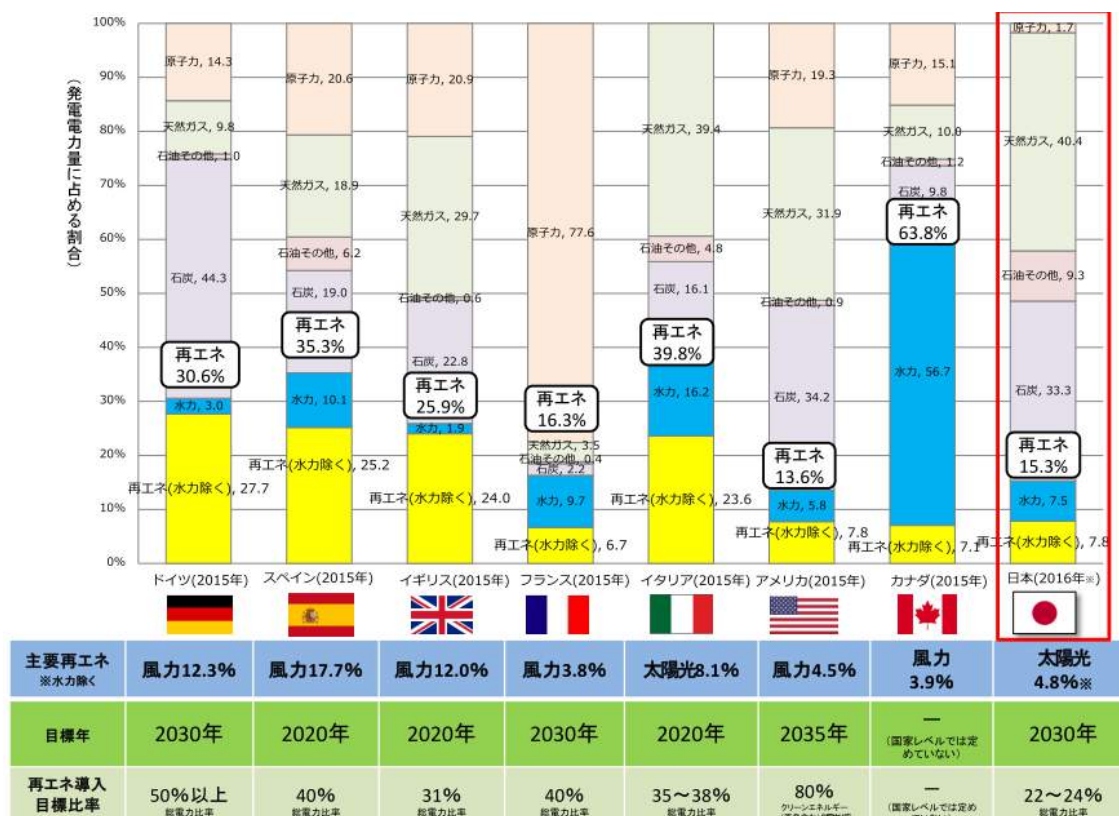


図 1.1 主要国の再生可能エネルギーの発電比率

### 1.1.3 波力発電の現状

様々な再生可能エネルギー開発にさらに拍車がかかるなか、地球表面の約70%を占める海洋は、膨大な潜在エネルギーを包蔵しており、きわめて有望なエネルギー資源である。

とりわけ日本においては、領土面積は世界 61 位だが、領海・排他的経済水域の広さは世界 6 位であり、波力発電他の海洋エネルギーの回収に対する期待は甚大である。(表 1)

ヨーロッパでは、再生可能エネルギーに関する R&D プログラムに波エネル



ギーを含めるという欧州委員会の 1991 年の決定によって、状況が変化した。1992 年以來、ヨーロッパでは欧州委員会から、波力に関する多くのプロジェクトに資金が提供された。

OMAE と ISOPE などの海洋工学の年次会議および世界再生可能エネルギー会議では、波力を中心とした海洋エネルギーに関するセッションがますます頻繁になっている。

多くのインセンティブな施策にもかかわらず、再生波力エネルギーの中で、波力エネルギー利用技術は、停滞したままである。先行する風力発電に対する距離は、縮まったとは言い難い状況にあるように見える。

その理由の最大のもは、波力発電の仕組みが複雑で、難しいことによるものと思われる。この状況を切り開くには、波の知識だけでは不十分で、その他に、振動工学の知識、海の知識、機械の知識、電気の知識、制御工学の知識、などが必須になってくる。

次章以下では、この問題を解明していくことになる。

表 1.1 海洋エネルギーのポテンシャル試算例  
(NEDO 再生可能エネルギー技術白書)

試算例	試算結果			前提条件等
	賦存量 <sup>*1</sup>	導入 ポテンシャル <sup>*2</sup>	発電 ポテンシャル <sup>*3</sup>	
前田・ 木下ら	—	50 GW	—	日本周辺の平均波力エネルギー密度を約 10 kW/m とし、日本全周 (約 5,000 km) で 100 % 吸収するとした場合
高橋ら	—	36 GW	—	日本沿岸の平均波力エネルギー密度を 7 kW/m と試算している。日本の総海岸線を 5,200km とした場合
波力発電 検討会	300 GW～ 400 GW			沖合いの波エネルギー密度 15～20 kW/m、沖合線長 10,000 km、風による復元効果を 2 倍とした場合
NEDO	195 GW (沖合 100 km まで)	現状技術： 5.4 GW  将来技術： 24.9 GW	現状技術： 19 TWh  将来技術： 87 TWh	<p><b>【賦存量】</b> 離岸距離 100 km の外周ラインで平均波力エネルギー密度を線積分して算出。</p> <p><b>【導入・発電ポテンシャル】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・沿岸固定式：沿岸部で、護岸に隙間なく設置</li> <li>・沖合係留方式：波に対して垂直方向に複数設置し、更にそれらを波の進行方向に多段に設置。</li> <li>・現状技術では離岸距離 30 km 以内かつ 100 m 以浅の外周ラインの距離から算出。</li> <li>・将来技術では離岸距離 100 km の外周ラインの距離から算出。</li> </ul>

## 1.2 波力発電の歴史

### 1.2.1 現状認識

ポルトガルの研究者 Falcao は、この四十年で、我々はどこまで来たのだろうか、問いかける。



図 1.2 波力発電の 40 年 (Falcao, 2013)

日本の研究者は、次のように述懐している。「海の波は厳しく、防波堤の歴史は多くの失敗の歴史でもあり、波に耐え得る防波堤の設計がほぼ可能となったのは最近に過ぎない。」「波が強大であればある程、それを利用しようとするのは当然である。しかし開発の早い段階で中止となった構造も少なくないが、それらは以下の点の検討に問題を持っていたと思われる。」

- (1) 幅広い波条件：限られた波条件で発電効率が非常に高いが、幅広い波条件(周期や波高)で高い発電効率が確保できない。

- (2) 波の不規則性：波は基本的に不規則であり，変動する波に対して効率が低下したり，発電出力の変動性が大きい．
- (3) 波向き：波向きや波の方向分散性により入射波エネルギーは低減する．装置の配置や波向きに考慮する．
- (4) 台風など厳しい条件に耐える構造：発電効率のために，複雑な構造となり，厳しい波が作用する場合に壊れ易い．
- (5) 耐久性が高く維持管理し易い：耐久性に問題があったり，維持管理が困難なこと．特に水中での維持管理が問題となる

このうち，(1)～(3)は，性能向上にかかわるもの，(4)(5)は耐久性にかかわるものであることがわかる．波力発電の普及には，この二つの壁を乗り越えるためのイノベーションが必須であると言える．

この問題の見当に入るにあたって，まず三人の先人の歩みを見てみたい．

### 1.2.2 益田善雄と日本の波力発電

「波力発電の父」と呼ばれ海外でも名高い．(益田，1987)

1964年益田式航路標識ブイの電源として初めて波力発電に成功した．この航路標識ブイが海上保安庁に採用され，世界で初めて実用化された波力発電装置となった．益田式航路標識ブイは，空気タービンを使った振動水柱型（OWC）の波力発電であるが，出力が小さく（500w以下）用途も限定される．しかし，工業製品として内外に普及した波力発電装置として，Yoshio Masudaの名前は海洋エネルギーの歴史を記した海外サイトで必ず登場する．この方式は，現在に至るも，商業的成功をおさめた世界唯一のものであることから，その後の日本においては，種々の大型振動水柱式波力発電（OWC）の開発に力が注がれて来たが，まだ成功に至ったものはない．

益田は，1976年に日本で，より大きい（12m×80m）異なる種類の空気タービンによる OWC を搭載した海明という名前の浮体型プラットフォームを建設した．

1990年頃には，2つの OWC プロトタイプが建設された．日本の酒田港の防波堤に設置された 60kW 級固定式 OWC と，沖合浮体式 OWC 「マイティホエー

ル」である。さらに、この延長上に、近年、酒田港で実証実験が行われた護岸設置型波力発電装置がある。

振動水柱式とは別に、日本で始まった方式として、1981年室蘭工大が開発した振り子式波力発電がある。この技術は、現在東京大学生産技術研究所に受け継がれ、岩手県久慈市などにおいて実証がすすめられている。

残念ながら、現時点においては、いずれの試みも、効率、出力、両面で、満足のいくものではない。

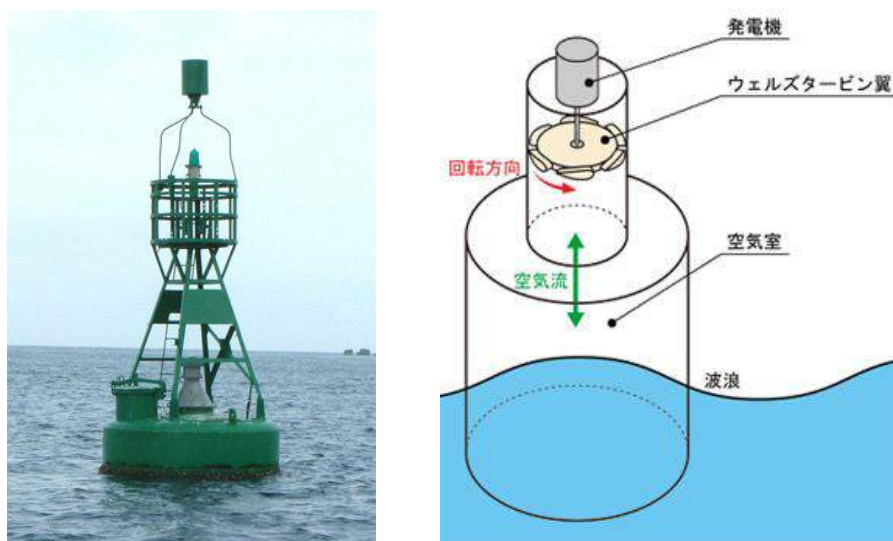


図 1.3 航路標識ブイと空気タービン式発電機（緑星社 HP）



図 1.4 「海明」（出典：海洋科学技術センター（現 海洋研究開発機構））





図 1.5 酒田港防波堤設置型 OWC (定格 60 kW)



図 1.6 沖合浮体式 OWC 「マイティホエール」 (定格 110 kW)



図 1.7 山形県酒田港の波力発電装置 (エム・エムブリッジ発表資料)

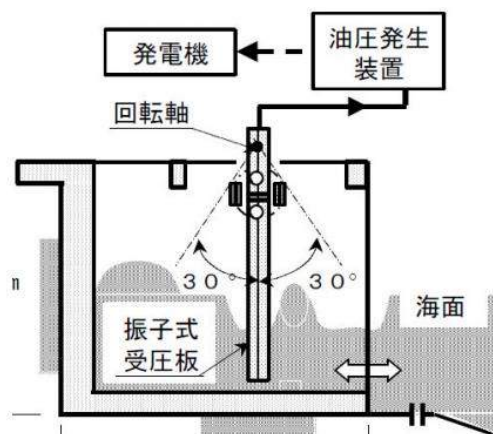


図 1.8 振り子式波力発電装置の原理（室蘭工大）



図 1.9 振り子式波力発電装置（久慈市 HP）

### 1.2.3 Stephen Salter と Salter Duck

Stephen Salter は、英国エジンバラ大学の名誉教授で、Salter Duck 波エネルギー変換器の発明者である。（Salter, 1974; 1981）

1973 年の石油危機は、再生可能エネルギーシナリオに大きな変化を引き起こし、大規模な波エネルギー生産への関心を高めた。1974 年に、Stephen Salter が、雑誌ネイチャーに発表した論文は、国際的な注目を集めた。北海での波力発電を目指して、波エネルギーの現代的、科学的追求を始めたのは彼である。英国政府は 1975 年に、波エネルギーにおける重要な研究開発プログラムを開始し、その直後にノルウェーが追随した。

彼の発明は Salter's Duck または Nodding Duck として知られている。Salter's Duck の小規模の制御試験では、波の 90% を消波し、その 90% を電気に変換した。

多方向波中での実験のために、彼の創意工夫で建設された、エジンバラ大学のワイドタンクは、波浪を吸収する世界初の多方向造波水槽である。89 枚の造波フラップは、フィードバック制御システムによって、波を造るとともに、フラップに向かって伝播する反射波を吸収するのである。

著者は、1982 年に吸収式造波装置の技術を学ぶために、訪英し、その開発の一端に触れることができ、その成果を 1986 年にまとめることができた。



図 1.10 Stephan Salter 当時の写真と手書きの名刺

波エネルギー変換器の開発および設計において、エネルギーの吸収は、理論的あるいは数値的に研究できるが、さらに模型水槽や水路を使った物理的模型実験でも調べることができる。適用される技術は、波浪中船舶の流体力学の技術とあまり変わらない。

数値モデルは、設計の第 1 段階で適用される。これは、ほとんどの場合、線形理論に基づいており、その限界は、粘性、渦、乱れなどに起因する損失を説明することができないこと、大振幅の波振動（非線形波）を正確にモデリングできないことである。このような影響は重要であり、造船や海岸構造物の場合には、経験的な補正がなされている。これらの理由から、装置の最終的な形状が、十分に確立されている場合には、造波水槽で模型試験（縮尺 1:80 から 1:10 程度）が実行されている。

Stephen Salter は、波力エネルギー変換器の模型試験のパイオニアとしても広く認識されている。1974 年、彼はエジンバラ大学の狭い水路で「ダック」コンセプトの実験的開発を開始した。



1977年に、このために建設されたソルターの実験施設は、エンジンバラを波エネルギー変換実験の中心地に押し上げた。89個の独立した造波板を備えた10m×27.5m×1.2mの平面水槽がその実験施設である。この造波装置は、吸収式造波装置として、日本にも数台が導入された。

その後、波エネルギー変換器コンセプトの開発がプロトタイプの実験施設に向かうにつれて、大縮尺模型実験の必要性は、きわめて大規模な実験施設を求めることになった。これは、ヨーロッパでは、トロンハイム（ノルウェー）、ワーゲンゲン（オランダ）、ナント（フランス）の大型造波水槽として実現した。



図 1.11 エジンバラ大学 ソルターダック



図 1.12 エジンバラ大学 「ワイドタンク」(多方向吸収式造波装置)



図 1.13 日本に導入された Salter の吸収式造波装置

#### 1.2.4 Johannes Falnes による波力発電理論

ノルウェー科学技術大学物理学科の名誉教授で、波力エネルギー研究に貢献し、その著書 *OCEAN WAVES AND OSCILLATING SYSTEMS* (Cambridge Press 2002) は、波力発電のバイブルとも言えるものである。

ポイント・アブソーバ効果の発見者の一人として、現代波エネルギー研究のパイオニアの一人である。その主な関心は、波浪エネルギーとその利用である。1970年代にノルウェーで、Kjell Budal と一緒に、波力エネルギー研究を開始した。Falnes と Budal は、電波の吸収能力に似て、海洋波エネルギーを、幾何学的形状に直接入射するものよりも理論的により多く吸収できる、いわゆるポイント・アブソーバ効果（アンテナ効果）を発見した。（Budal and Falnes, 1975）

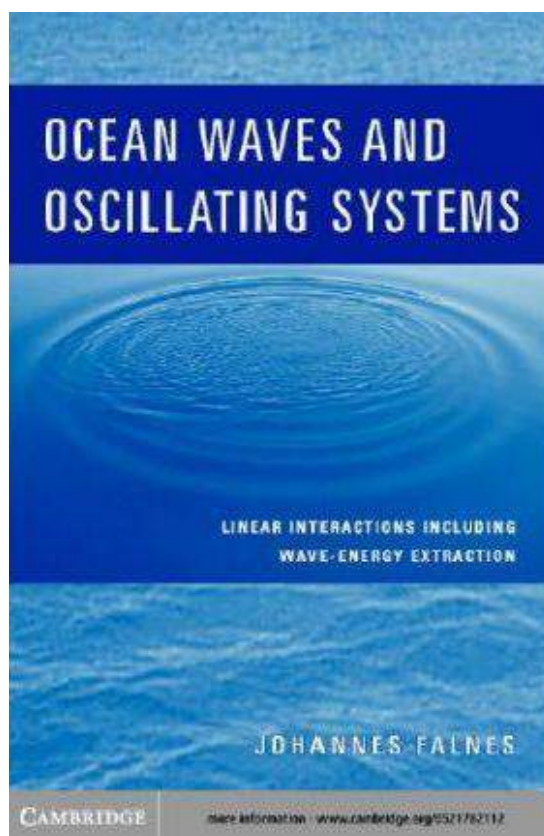


図 1.14 Ocean Waves and Oscillating Systems

幅当たりの平均波パワーと、平均吸収パワーがわかったので、平均吸収パワーを平均波パワーで除すると、どれだけの幅のパワーが吸収できたかが計算できる。

これを捕捉幅（エネルギー吸収幅）と定義すると、最大捕捉幅は、

$$C_{\max} = \frac{P_{abs.\max}}{P_w} = \frac{1}{k_0} \equiv \frac{L}{2\pi} \dots\dots\dots(1.1)$$

波長/2π分のパワー吸収が可能であるとの結果が得られることになる。ところが、この式には、波吸収体の直径や幅などの寸法要素が一切含まれていない。

例えば、T=10sのとき、波長λ=156m、よって捕捉幅λ/2π=25m、25m x 7kW/m（日本周辺の平均波パワー）=175kWとなり、浮体の大きさとは無関係に、175kW取得可能ということになる。この、自分の幅以上の波パワーを取得

できる現象は、「ポイント・アブソーバ効果」または「アンテナ効果」と呼ばれる。(Budal and Falnes, 1975; Evans, 1976; Newmann, 1976)

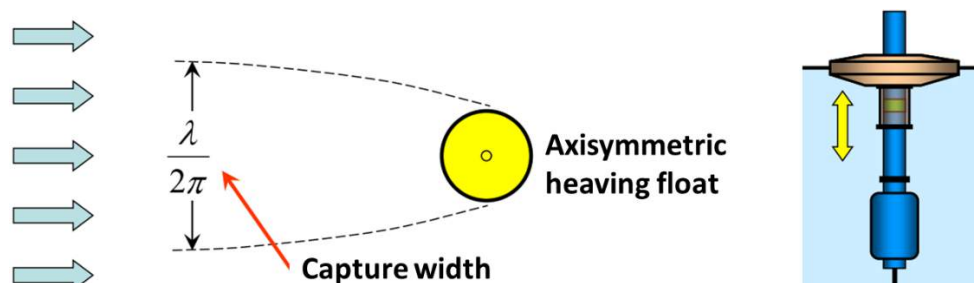


図 1.15 Falnes 他の発見：ポイント・アブソーバ効果 (1)

上下振動型軸対称浮体の場合

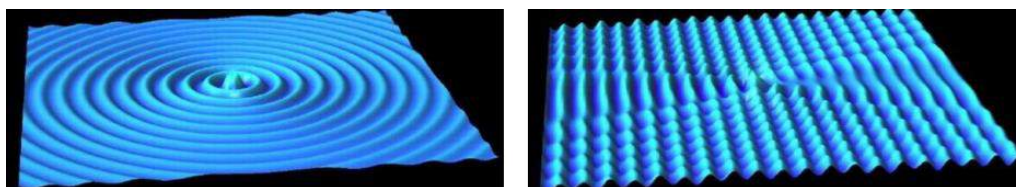


図 1.16 Falnes 他の発見：ポイント・アブソーバ効果 (2)

ポイント・アブソーバが作る波(左)と入射波との干渉(右)

Falnes は、その著作中で、「良い造波装置は、良い吸収装置である」、「波を消すことは、波を造ることだ」と、繰り返し説いている。この言葉の意味は次の二つの図において明らかになる。「波を造ることができない波力発電機には成功は覚束ない」はずだ。(Falnes, 1995; 2002; 2007)

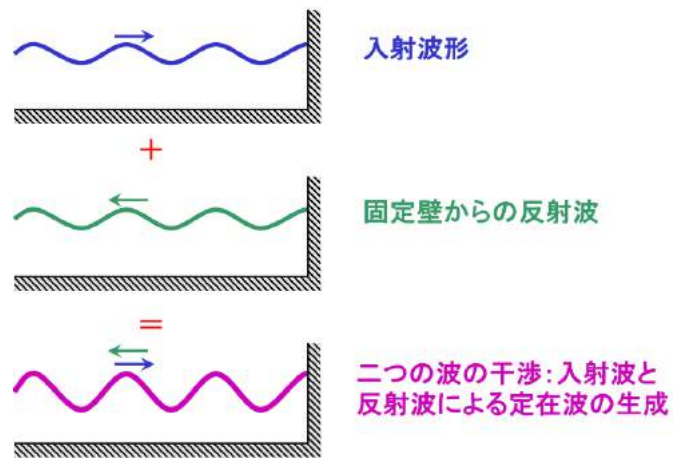


図 1.16 完全反射:直立壁の場合

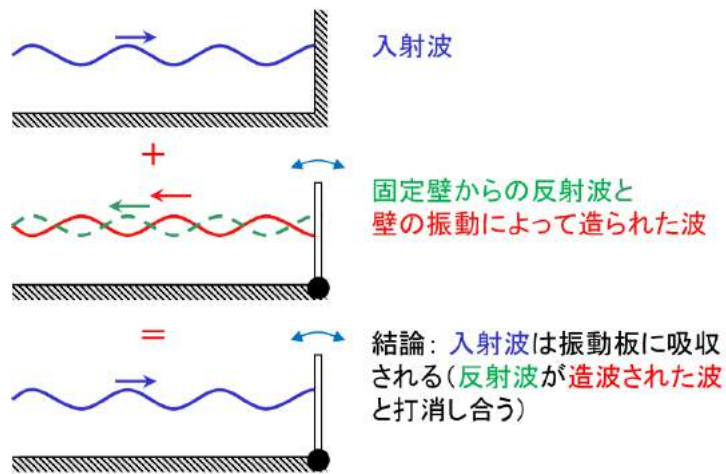


図 1.17 可動板の造波による完全吸収の説明

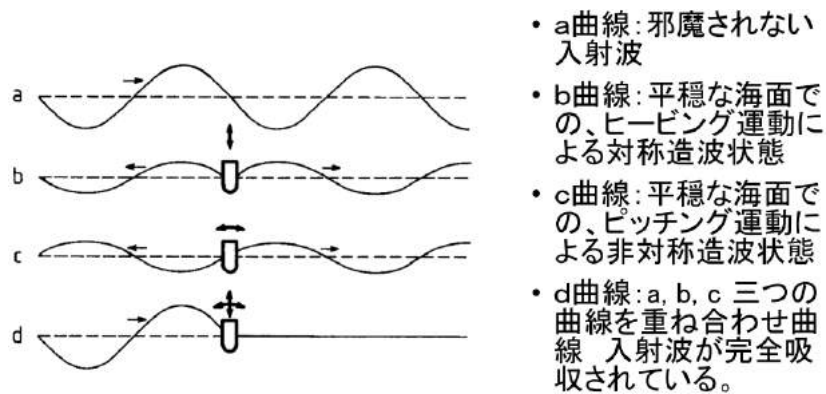


図 1.18 可動浮体による波の吸収の説明

上下動による造波と前後動による造波を組み合わせた完全吸収



ポイント・アブソーバという用語は、もともと海の波長に対して十分小さく、点と見なせるという意味で使用された。彼の著作では、振動水柱型もポイント・アブソーバの一種類として取り扱われている。

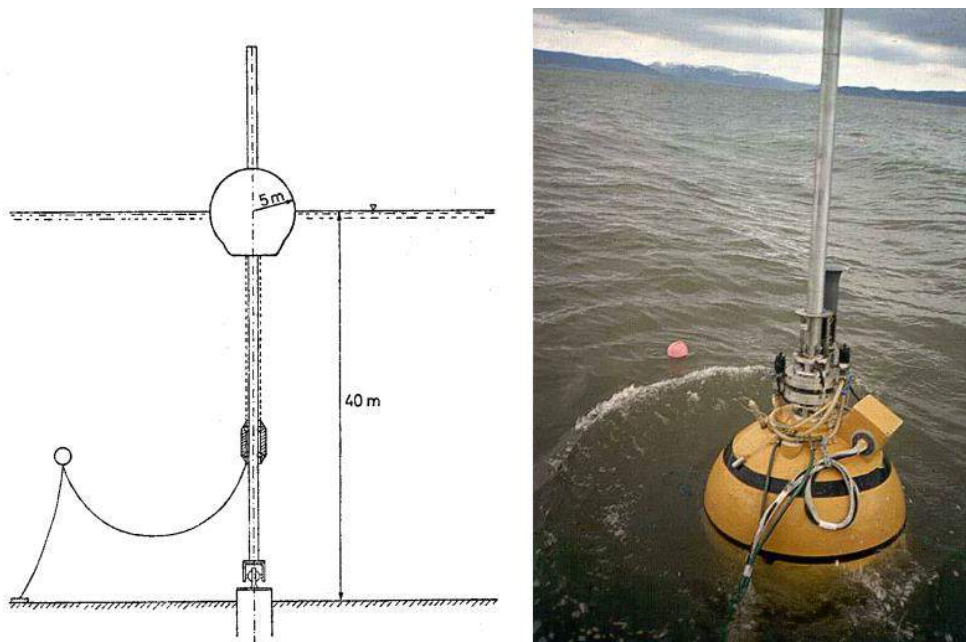


図 1.19 トロントハイム・ポイントアブソーバ

船舶などの浮体を取り扱うときに、問題になるのが、ばねマスダンパー系の固有周期である。ばね定数  $k$  [N/m] のばねの片端を固定し、片端に質量  $M$  [kg]をつけたとき、固有周期  $T$  [sec] は以下である。

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K}} \dots\dots\dots(1.2)$$

円柱を水に浮かせたとき、円柱にかかる復元力（浮力－重量）は、バネ力として働くので、ばね定数  $k$  は、円柱断面積  $A$  を用いると、 $k = \rho g A$  ( $g$  : 重力加速度  $9.8\text{m/sec}^2$ ,  $\rho$  : 水の密度  $1000\text{kg/m}^3$ )、また  $M$  は、喫水（水没深さ）を  $d$  とし、さらに水中であることから、付加質量 10%を考慮すると、

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{1.1M}{K}} = 2\pi \sqrt{\frac{1.1 \cdot \rho A d}{\rho g A}} = 2\pi \sqrt{\frac{1.1d}{g}} \dots\dots\dots(1.3)$$

この式から、固有周期は、円柱の直径とは無関係に、喫水 1m のとき 2.1 秒、喫水 4m のとき 4.2 秒、また喫水 9m のとき 6.3 秒となる。

海の波の場合、周期は 5－15sec とされる。もし浮体の固有周期が波の周期と

同じにできれば、共振が起こる結果、大きなエネルギーを取り出すことが可能になるので、フライホイールを使って、円柱の固有周期を調整する方法について考える。前述の円柱の上部にナットを取り付け、そこに円柱を貫通するボールねじを設ける。円柱およびナットに回り止めをつけると、その上下運動で、ボールねじが回転する。ボールねじの上端に円盤を取り付け、一緒に回転するようにすると、この円盤はフライホイールとして動し、浮体周期の長周期化に寄与できるが、周期範囲を広げるには別の工夫が必要になる。

海の波に対する浮体の応答を示したのが周波数応答曲線になる、図の赤線の場所が共振点であり、入力（海の上下変位）に対して出力（浮体の上下変位）が、数倍になり、90°遅れていることがわかる。

海の波の幅広い周期に対して、共振させるために、Falnes の取った方法は発電機の制御力を使用することであった、すなわち

$$M + \Delta M \ddot{Z} + N + C_m \dot{Z} + K + K_m Z = F \dots\dots\dots(1.4)$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{M + \Delta M}{K + K_m}} \dots\dots\dots(1.5)$$

ここで、 $Z$  は、浮体の位置、 $M$  は浮体の質量、 $F$  は波強制力。ラディエーション抵抗は、線形理論によって、線形の付加質量  $Ma$  と、造波減衰係数  $N$  に分解できる。ばね定数または静水圧の復元力係数は、 $K = \rho g A_w$  ( $A_w$  は水線面積) である。 $C_m$  は発電負荷、 $K_m$  は発電機制御力を示す。

すなわち発電機の制御力を使用することにより、系の固有周期  $T$  を波周期に合わせれば、共振が達成できることになる。

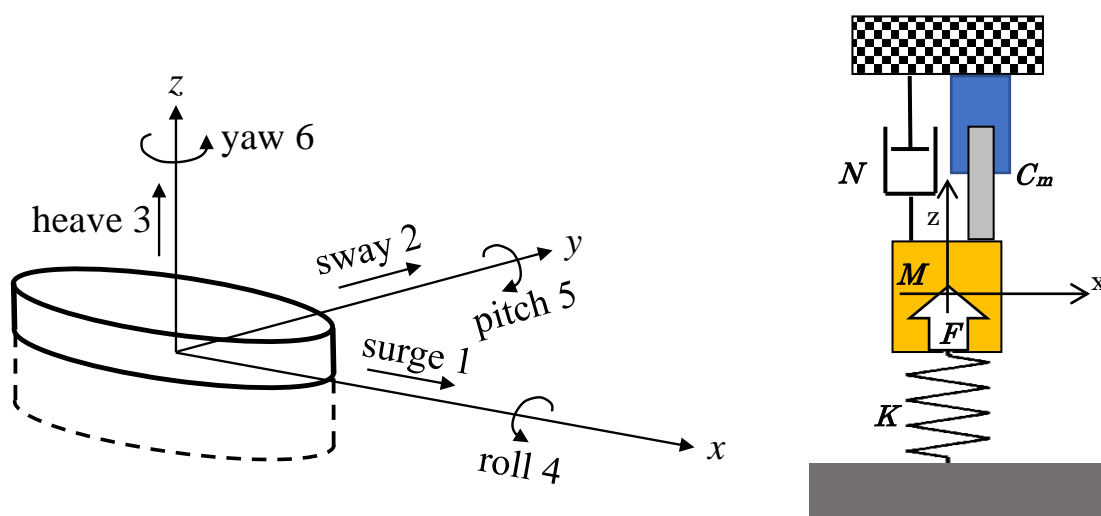


図 1.20 浮体の上下運動とばねマスダンパー系

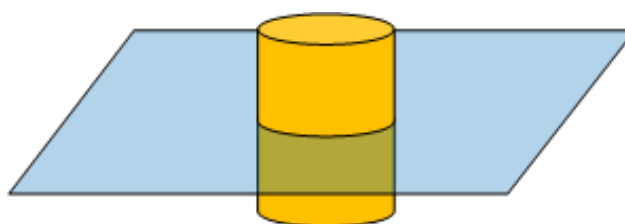


図 1.21 浮体の固有周期

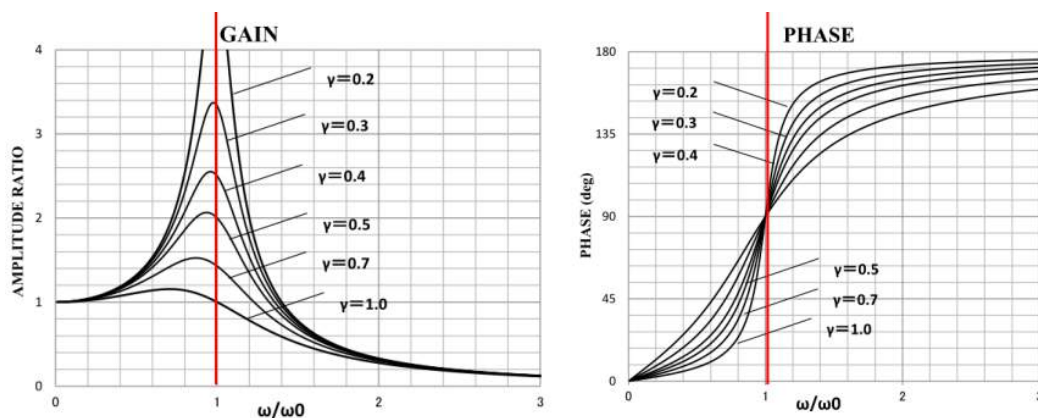


図 1.22 ばねマスダンパー系の周波数応答曲線

復元力項の  $Km$  を使用して、共振を起こそうとする方法は最適制御であり、復元力項を操作するためにリアクティブ制御（無効電力制御）とも言われる。Falnes は、リアクティブ制御で  $Km$  を操作することにより、共振条件が満たさ



れることを解明したが、どうすればこれを現実にするかの解は見いだせないままであった。

最適なリアクティブ制御に代わる準最適な方法として、Falnesse が考案したのはラッチング制御である。現在のところ、共振をもたらす最適制御をどうやって実現するかについて、多くの議論がある中で、具体的な提案としては、いまだラッチング制御しか無いのが実情である。

ラッチングは、位相制御（水面変位から浮体変位の位相をずらす制御）を実現する方法である。図に示すように、浮体は、動作の上下限において、速度がゼロになった瞬間から一定時間ロック（固定）、またはラッチ（保持）し、その後解放する方法である。ラッチングは、ブイを、より共振条件に近い状態で動作させることができ、したがって電力吸収を増加させる可能性があり、入射波周期よりも固有周期が小さい浮体で効果があるとされる。この方法の問題は、どの瞬間にロックを解除するかが決めにくいことで、いまだに多くの議論を生んでいる。

図は、最適共振制御（リアクティブ制御）と準最適＝疑似共振制御（ラッチング制御）の変位波形の違いを示したものである。いずれの方法であっても、浮体の変位が水面変位に対して、 $90^\circ$ 遅れていることがわかる。

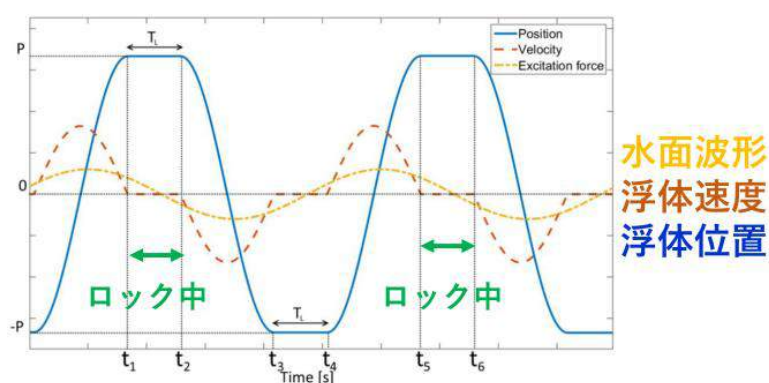


図 1.23 ラッチング制御の方法

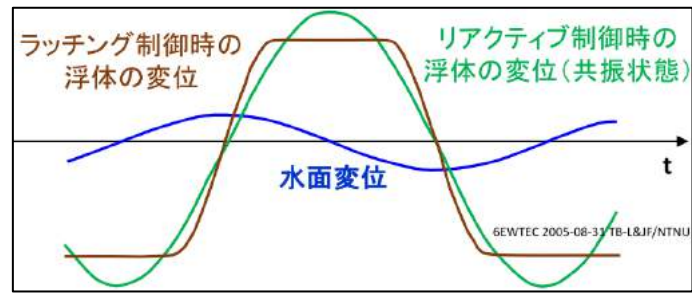


図 1.24 Falnes のラッチング制御=疑似共振方法

共振状態では,浮体変位が水面変位から  $\pi/2$  遅れ,振幅は数倍になる.

変位波形の違いは些少であるが,積算パワーには,相当な差がでることがみとれる.

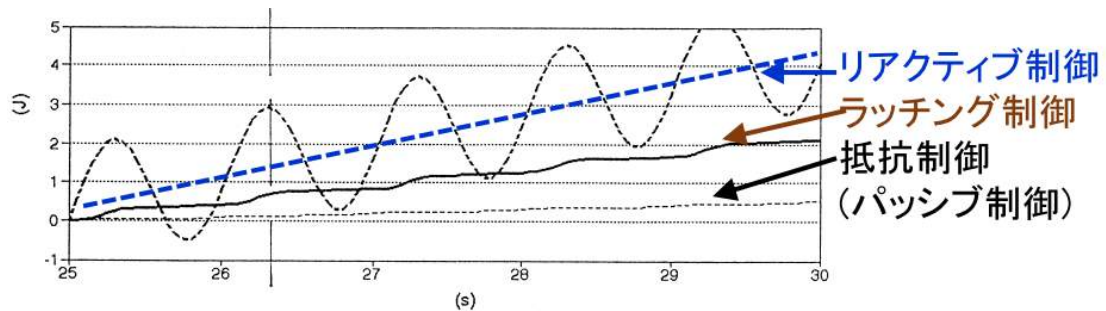


図 1.25 振動浮体による積算パワー(J):三種類の制御方法による発電量の差

リアクティブ制御では,浮体と発電機の間でエネルギーの授受がある

### 1.2.5 波力発電の分類と発電原理

現在，波力発電として提案されているものをまとめると，表のように分類される．一見，複雑多岐にわたっているように見える..

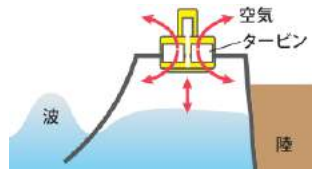
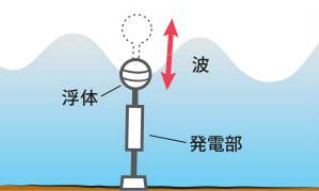

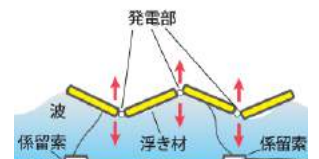
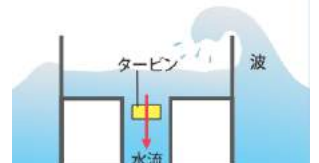
しかし，Falcao(2010)は，その発電原理は，振動水柱式，振動物体式，越波式の三種類に過ぎず，そのうちで，振動水柱式と振動物体式の二つは，共振することで最大の効果を発揮できるという．

日本で採用されてきた方法，たとえば水柱振動式と振り子式は，全く異なる方法に見えるが，数学モデルとして見た時には，共振が発電原理になっているのは確かである．

表 1.2 波力発電方式と発電原理

発電原理	方式	例
共振 (吸収)	振動水柱	航路標識ブイ、海明、マイティホエール、 三瀬、酒田港、越前ブローホール
	振動物体	振り子式、海陽、PELAMIS、 PowerBuoy、大洗
遡上	越波式	

表 1.3 波力発電の分類 (NEDO 技術戦略研究センターレポート)

種類	技術の特徴
<b>振動水柱式： Oscillating Water Column (OWC)</b> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 装置内に空気室を設け、海面の上下動によって生じる空気室内外の圧力差によりタービンを回転させる。</li> <li>● 往復気流中でも一方向に回転する衝動タービンやウェルズタービンが用いられる。</li> <li>● 日本で開発されてきた波力発電においても多く採用されている。</li> </ul>
<b>振動物体式： Point Absorber</b> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 浮遊構造物で水面や水面下の浮きを利用して波のエネルギーを吸収し、機械的エネルギーに変換する。</li> <li>● 海外では比較的TRLが高いとされている。</li> <li>● ECのJRC (Joint Research Centre) による調査では、世界で開発中の波力発電の約4割はPoint Absorber式である。</li> </ul> <p>TRL (Technology Readiness Level, 技術成熟度レベル)</p>
<b>振動物体式： Oscillating Wave Surge Converter</b> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 振り子構造や逆振り子構造の波受け板等により、波の動きを受けて高圧水を発生させ、陸上等に設置した水力発電タービンへ送り込む。</li> </ul>
<b>振動物体式： Attenuator</b> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 複数の浮き材を並べて互いに相対動可能に接続した筏体で波のエネルギーを吸収し、回転運動等に変換して発電する。</li> </ul>
<b>その他の振動物体式</b>	<p>波によるデバイスの振動を内側の偏心構造物の回転体やジャイロスコープの運動に変換する方式 (Rotating Mass), 水平軸タービンを利用する方式など。</p>
<b>越波式： Overtopping</b> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 貯水池などに越波させて貯留し、貯水面と海面の高低差を利用してタービンを回して発電する。</li> <li>● 比較的構造は単純で可動部は少ないが、出力に対し設備が大型となる傾向にある。</li> </ul>
<b>課題等</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 波力は天候等により出力が変動する電源であるため、安定した電源と比較して、より低コスト化が求められる。</li> <li>● 海面の運動を利用するため、台風・荒波の対策も重要。</li> <li>● 一部の方式では、波の周期により単機出力が変動するため、複数機で平準化が必要。</li> <li>● 波力のエネルギー密度は比較的小さいため、小規模 (~数百 kW) のデバイスの複数機設置が望ましいが、多数機による沿岸、海域占有においては、他の海洋設備との組み合わせ等も重要。</li> </ul>	

### 1.3 本研究の目的

#### 1.3.1 Salter・川口による吸収制御

Salter と著者とは，Falnes の提示した吸収方法に対して，図のような解を出した．すなわち，振動板前面で検出した波情報を使用して，振動板の速度を制御する方法である．Salter は力を検出するのに対して，著者の方法は波形を検出する．いずれも一長一短がある．

さらに，著者は，速度ポテンシャル理論に基づいて，この方法を理論づけ，吸収式造波制御として発表した．（川口,1986；Hirakuchi et al., 1990）

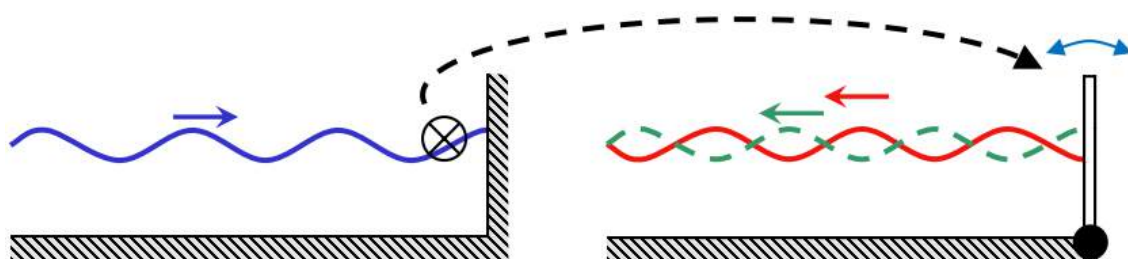


図 1.26 Salter と川口による吸収制御方法

自然界では，まず太陽の働きによって風が起こり，風によって波が発生するが，人工的に波を造るには，水に対して，板や浮体あるいは空気などで，周期的な振動を与える方法がとられている．これは，水のかたまりを機械的に押し引きして，波を造ることに他ならない．このように，水を排除して，波を造る機械は，造波機と呼ばれ，主に次のような3種類が使用されている．

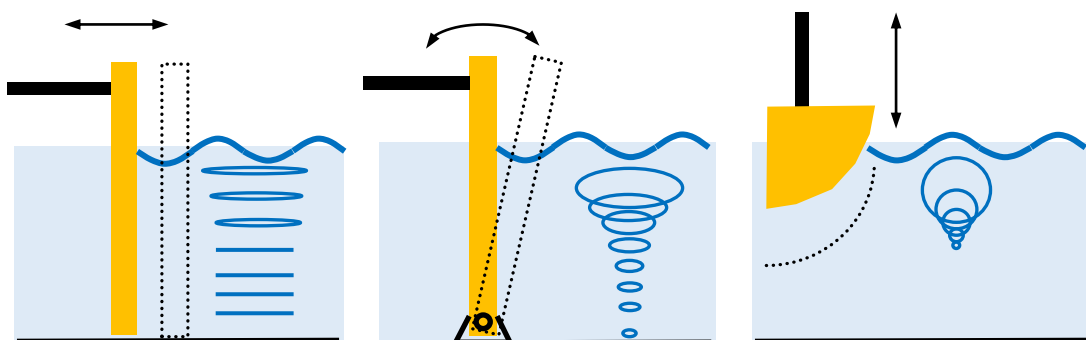


図 1.27 Type of Wavemakers, Piston, Flap and Plunger (from left to right)

これらの造波機においては，来る波を消波する機能を備えているものがあり，それらは吸収式造波機と呼ばれている．波エネルギー変換器とは，波エネルギー



一を電気エネルギーに変換する機械である。つまり電気エネルギーが取得されることと引き換えに、波エネルギーは無くなるはずである。波を消すことができない波エネルギー変換器は、変換効率が低いことを示している。

吸収式造波制御が発表されて以降、日本の造波装置は、従来型の位置制御型造波方法から、吸収式造波方法へと置き換わっていった。この流れは、造波板での反射を嫌う、港湾関係において最も早かったが、徐々に船舶関係にも広がっていった。

この水槽の完成を報じた論文には、「本装置の吸収性能は、造波機正面から入射する周期 0.80sec~2.53sec の規則波に対し波エネルギーの 97%以上であり、他の周期範囲においても波エネルギーの 85%以上の吸収性能を確保している。また、造波機に対し斜めから入射する波についても十分な吸収性能を有し、斜め 45 度から入射する波長 5m の規則波に対して波エネルギーの 85%以上の吸収性能を確保している」と記載されており、波力発電装置としても十分な性能であることを示している。(谷澤他, 2011)

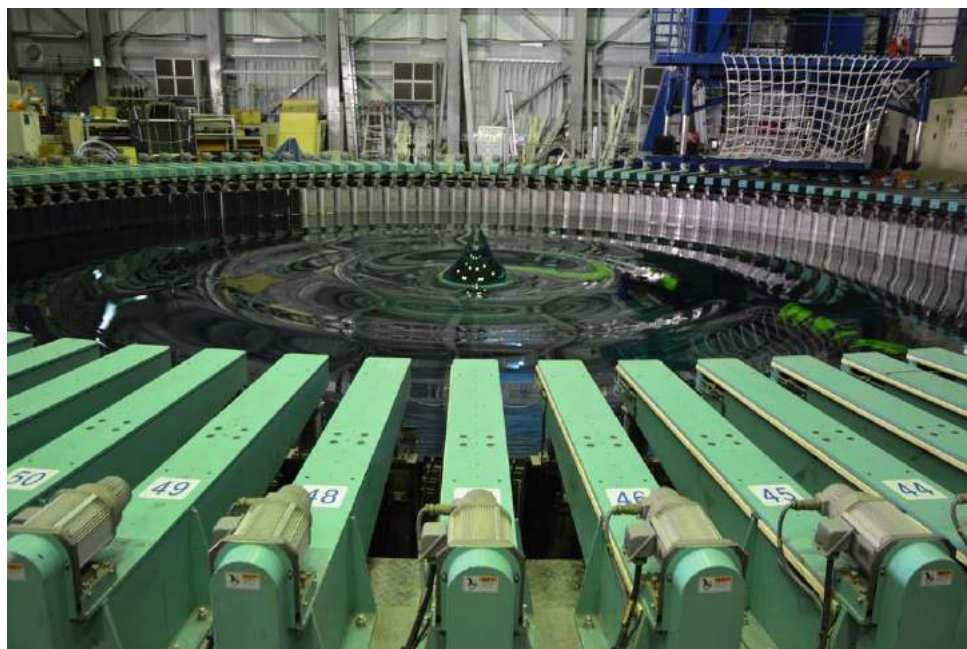


図 1.28 深海水槽 (海上技術安全研究所)



図 1.29 実海域再現水槽（海上技術安全研究所）



図 1.30 環境インテリジェント水槽（港湾空港技術研究所）

### 1.3.2 吸収と共振に関する仮説

波力発電は、百年以上前から試みられて来たが、いまだ商業的な技術ではない。他の再生可能エネルギーと比べ、波は強制振動であるという特殊性を持っている。風力発電などで使用されている方法によって、強制振動からパワーを取得するのは難しい。

このために、Falnes は、前述したごとく、ばねマスダンパー系の強制振動理論から、共振制御の概念を導き出したが、概念だけで実現はできていない。かたや、Salter・川口は、速度ポテンシャル理論から、吸収制御という方法を発見し、造波装置の分野で実用化を果たした。

まず，収と共振という二つの概念は，同じ事象を意味しているのではないかという仮説をたてる．吸収についてはすでに造波機の世界で実用化済みの技術であるので，もしこの仮説が正しいならば，この方法によって共振が容易に実現でき，波力発電の大きな性能向上につながるはずである．

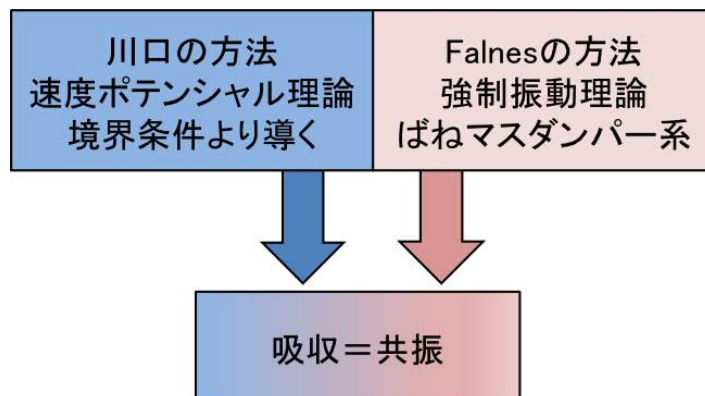


図 1.31 吸収と共振とは同一の概念であるという仮説

### 1.3.3 本論文の構成

この仮説を証明するために，本論文は以下の構成をとる．

- 二つの型の WEC，ピストン型造波機として知られる前後運動型 WEC と，ポイント・アブソーバとして知られる上下運動型 WEC について，以下の検討を行う．
- 速度ポテンシャル理論により，吸収制御による制御式を求める．
- Falnes の提案するリアクティブ制御（共振制御）方法を，強制振動理論により，定式化し，具体的な制御式を導き出す．
- 二つの方法で得られた制御式が同一であることを確認する．
- 得られた制御式の有効性を，模型実験で確認する．
- 大洗港において，実証試験を行い，発電性能を確認する．



## 第2章 波力発電における吸収と共振

## 2.1 制御戦略

### 2.1.1 制御の基本戦略

Falnes の理論は,数学的理論であるが,制御理論ではない。

制御とは,制御対象がある特定の目標を達成できるように,適切に計測した検出量に基づいて,適切な操作を対象に加えることである. これを図にした代表的なものが,図 2.1 であり,制御ブロック図と呼ばれる。

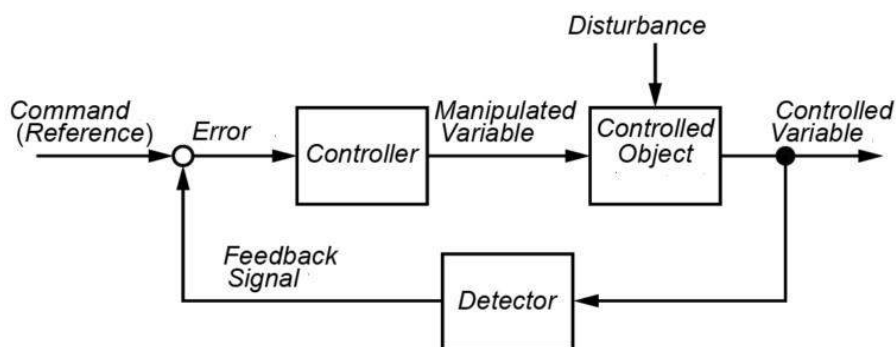


図 2.1 制御ブロック図

図 2.2 は,よく使用される水槽の水位制御の例である. バルブの開閉で,水位や水量を制御するときはこのようにして制御することになる. 注意すべきは

- 目標値が変化するとき,結果がそれに一致するまでに時間がかかること
- 目標 (指令) を更新する時間間隔は適切に選ぶ必要があること

海の波は,数秒で変化する現象であることから,指令の更新間隔は,0.1 秒以下であることが望ましい. コンピュータなどのデジタル演算を使うときに,どれほど正確であっても,0.1 秒以上かかったら,波という現象に追いつかないため,制御にならないのである。

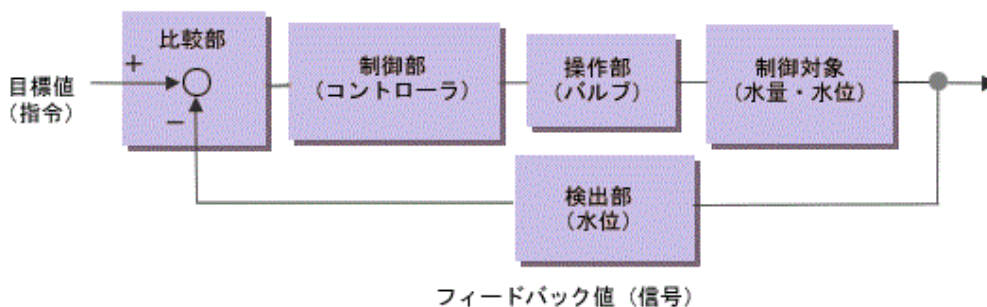


図 2.2 水位制御のブロック図の例

### 2.1.2 パワー・テイクオフ（電力取り出し）の条件

波が伝搬するとき、波の山と谷が繰り返し作られる。波の山では、水が上と前に動き、谷では、下と後ろに動く。波が通り過ぎると、水の粒子は、円で動きその場所を離れない。しかし、この運動のエネルギーは、その次の水粒子に伝達される。この水粒子の軌道運動は、波が物体を通過するとき、物体を上または前後に動かす。

このことから、次の図に示すような、直線運動機構を使用したパワー・テイクオフによって、物体を上下あるいは前後に動かす方式で考えることとする。

図中に振動水柱方式も含まれている。空気により送風機を正逆転させるが、これもまた一種の直線運動機構と見なすことができる。

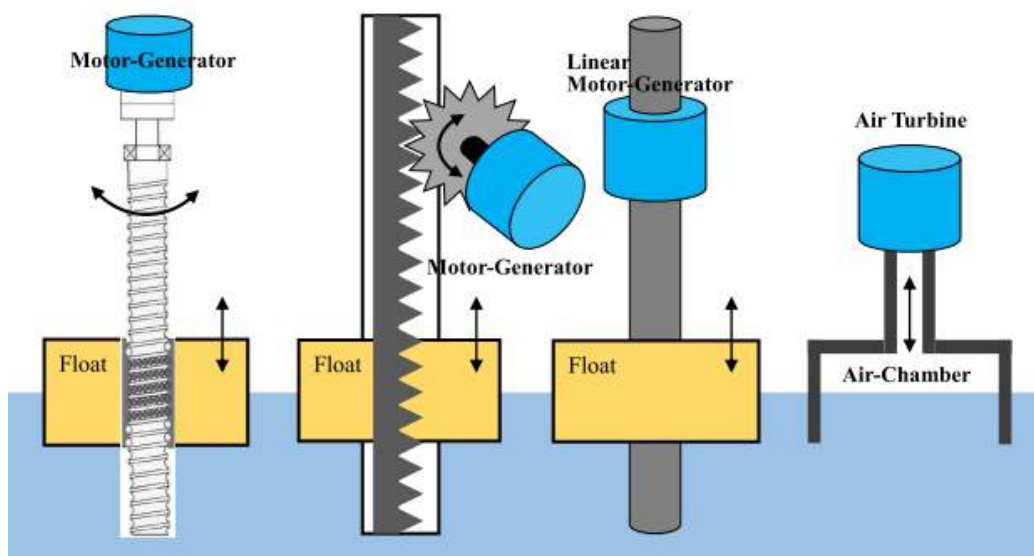


図 2.3 パワー・テイクオフ

### 2.1.3 発電機の種類

波力発電の制御系において、操作されるものは発電機である。

波力発電が、風力発電と異なるのは何か。風が一方方向の運動なのに対して、波は往復運動である。風力発電では、一般的な発電機で、事足りるが、波から効率的にエネルギーを取り出すには、正逆転できる発電機（モータ・ジェネレータ）が必要になる。これは電気自動車などで使用される、回生機能を持った

モータである。

モータ・ジェネレータは、発電機として逆の機能で使用された場合、機械エネルギーを電気エネルギーに変える。例えば、電動機で駆動される車は、回生ブレーキを使用したときには、発電機として、車輪から機械的エネルギーを電気エネルギーに移すことによって制動する。

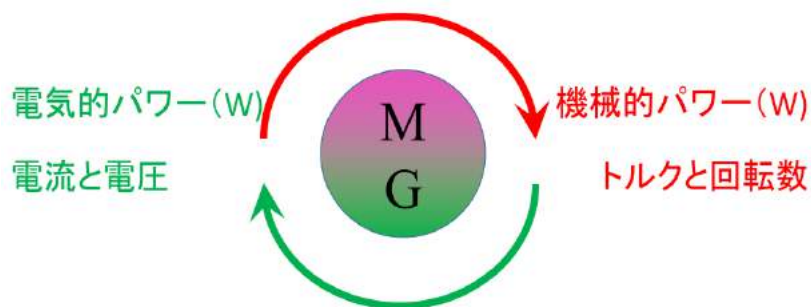


図 2.4 モータ・ジェネレータ（電気自動車などで使用）の概念

このような場合には、モータは2つのモード、駆動（モータリング）とブレーキ（回生）で動作する。両方向の回転で動作し、モータリングと再生の両方を生産することができるモータードライブは、4象限可変速ドライブと呼ばれる。電気自動車の場合には、最初の象限は前進運転、第2象限は前進ブレーキ、第3象限は逆転運転および逆転ブレーキである。

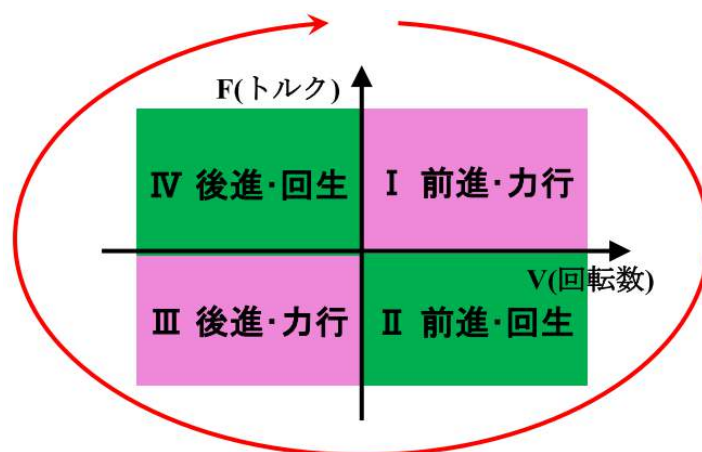


図 2.5 4象限運転時の力-速度曲線

モータ・ジェネレータを制御するために、3つのモード、トルク制御、速度制御と位置制御がある。

- (1) トルク制御モードでは、モータはトルク変換器になる。モータは、速度が許容範囲内にある場合、回転速度に関係なく、ユーザーが設定したトルクを発生する。
- (2) 速度制御では、モータの速度が制御できる。モータは、トルクが許容範囲内にある場合、モータに接続された負荷の大小に関係なく、ユーザーが設定した速度で正確に回転しようとする。
- (3) 位置制御モードでは、精密位置決めができる。モータは、設定位置に追従する。設定位置が一定であれば、外力がそれを動かそうとしても位置を保持する。この三つのモードの中で、速度制御は、波力エネルギー変換のための最良の戦略になることを、以下で説明する。

## 2.2 前後運動による吸収

### 2.2.1 前後振動体の速度ポテンシャル

座標系として、図に示すように、 $x$  軸を水路右方向に、 $z$  軸を水面から上方向にとるものとし、 $x=0$  の位置に前後運動板の運動中心を置く。

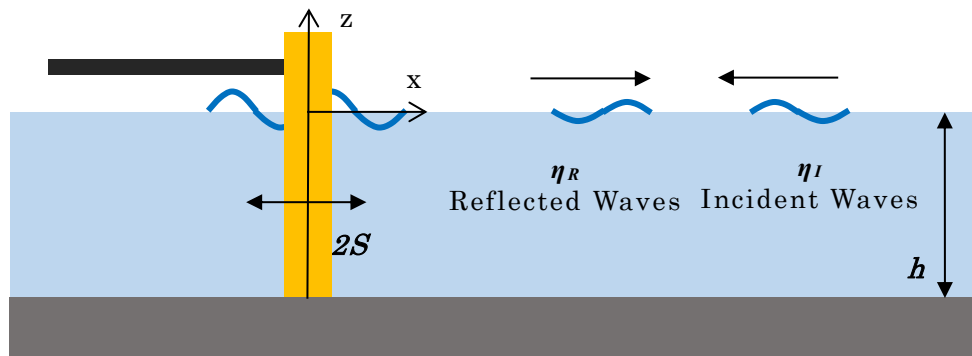


図 2.6 前後運動板の動作

非圧縮性、非粘性および非回転性の流れを仮定すると、我々は、流体力学の基本法則（質量と運動量の保存）を満たす連続関数として、速度ポテンシャル  $\phi(x, z, t)$  を定義することができる。

前後振動板が、振幅  $S$ 、角度周波数  $\omega$ 、および初期位相  $\varepsilon$  で振動する場合、微小振幅波を仮定すると、速度ポテンシャルは以下を満足しなければならない。

$$\Delta\phi = 0 \dots\dots\dots(2.1)$$

$$\frac{\partial\phi}{\partial x} = -\frac{\partial x}{\partial t}, \quad \frac{\partial\phi}{\partial z} = -\frac{\partial z}{\partial t} \dots\dots\dots(2.2)$$

水底において、底面に垂直な方向の流速成分は 0 であるので

$$\frac{\partial\phi}{\partial z} \Big|_{z=-h} = 0 \quad (z = -h) \dots\dots\dots(2.3)$$

自由表面を持つので、

$$\left[ \frac{\partial^2\phi}{\partial t^2} + g \frac{\partial\phi}{\partial z} \right]_{z=0} = 0 \dots\dots\dots(2.4)$$

振動板前面の速度が、振動板速度と一致するので、

$$\frac{\partial \phi}{\partial x}_{x=0} = -S\omega \cos \omega t \quad (0 > z > -h) \dots\dots\dots(2.5)$$

振動板右側の入射波と振動板の動きの関係で注意すべきは、入射波面が波の山になるとき、振動板は最高速度が、左側に行くことである。

### 2.2.2 入射波と反射波

海洋から来る入射波  $\eta_I$  が、前後振動体に当たり、反射波  $\eta_R$  が沖側に向かうことを考える。

$$\eta_I = a_I \cos(\omega t + k_0 x + \varepsilon) \dots\dots\dots(2.6)$$

$$\eta_R = a_R \cos(\omega t - k_0 x + \varepsilon) \dots\dots\dots(2.7)$$

ここに、 $a_I$  および  $a_R$  は入射波と反射波の振幅、 $\omega$  は角周波数、 $k_0$  は波数、 $\varepsilon$  は初期位相である。このとき、位置  $x=0$  における入射波と反射波の波形は、

$$\eta_I = a_I \cos(\omega t + \varepsilon) \dots\dots\dots(2.8)$$

$$\eta_R = a_R \cos(\omega t + \varepsilon) \dots\dots\dots(2.9)$$

ここで、前後振動体の速度を調整して、入射波を吸収しながら、同時に反射波を発生することを考える。

前後振動体の変位は、入射波吸収のための変位  $X_I$  と、反射波造波のための変位  $X_R$  の和である。それぞれの変位の振幅を、 $S_I$  および  $S_R$  とすると、その関係は、

$$S_R = K_R \cdot S_I \dots\dots\dots(2.10)$$

従って、変位と速度は、以下で表現できる。

$$X = X_R + X_I = S_R \sin(\omega t + \varepsilon_R) - S_I \sin(\omega t + \varepsilon_I) \dots\dots\dots(2.11)$$

$$\dot{X} = \dot{X}_R + \dot{X}_I = S_R \omega \cos(\omega t + \varepsilon_R) - S_I \omega \cos(\omega t + \varepsilon_I) \dots\dots\dots(2.12)$$

変位  $X_R$  によって造波された波が、正方向へ進行し、変位  $X_I$  によって消波される波が、負方向に進行する場合、 $x$  が正の領域の速度ポテンシャルは、微小

振幅波理論によって、以下で表現できる.

$$\begin{aligned} \phi = & \bar{A}S_R \frac{g \cosh k_0(z+h)}{\omega \cosh k_0 h} \sin(\omega t - k_0 x + \varepsilon_R) \\ & + \bar{A}S_I \frac{g \cosh k_0(z+h)}{\omega \cosh k_0 h} \sin(\omega t + k_0 x + \varepsilon_I) \\ & - \cos(\omega t + \varepsilon_R) \sum_{m=1}^{\infty} \bar{C}_m S_R \frac{g \cos k_m(z+h)}{\omega \cos k_m h} e^{-k_m x} \\ & + \cos(\omega t + \varepsilon_I) \sum_{m=1}^{\infty} \bar{C}_m S_I \frac{g \cos k_m(z+h)}{\omega \cos k_m h} e^{-k_m x} \end{aligned} \dots\dots\dots(2.13)$$

$$\frac{\omega^2}{g} = k_0 \tanh k_0 h = -k_m \tan k_m h \dots\dots\dots(2.14)$$

ここに、 $g$  は重力加速度である.

前後振動体が、板である場合には、 $\bar{A}$  および  $C_m$  は、以下の式で、解析的に計算できる.

$$\bar{A} = \frac{2 \sinh^2 k_0 h}{k_0 h + \sinh k_0 h \cosh k_0 h}, \quad \bar{C}_m = \frac{2 \sin^2 k_m h}{k_m h + \sin k_m h \cos k_m h} \dots\dots\dots(2.15)$$

式(2.13)の右辺第一項は、 $x$  正方向への進行波を、第二項は、 $x$  負方向への進行波を示す. また第三項および第四項は、前後振動体の前面で最大波高を持つ波長無限大の定常波である.

この第一項が、反射波  $\eta_R$  に、また第二項が、入射波  $\eta_I$  に等しくなるためには、

$$\bar{A} \cdot S_R = a_R \quad \text{and} \quad \bar{A} \cdot S_I = a_I \dots\dots\dots(2.16)$$

ここで、 $\bar{A}$  は、制御工学では伝達関数振幅特性、あるいは船舶工学では発散波振幅比と呼ばれるパラメータである. 造波機の場合、ピストン型やフラップ型については解析的に計算できるが、上下振動型では数値計算が必要である.

速度ポテンシャルより、前後振動体前面の波は、以下で表現できる.

$$\begin{aligned} \eta_0 = & \frac{1}{g} \left( \frac{\partial \phi}{\partial t} \right)_{\substack{x=0 \\ z=0}} \\ = & \bar{A}S_R \cos(\omega t + \varepsilon_R) + \bar{A}S_I \cos(\omega t + \varepsilon_I) + \sum_{m=1}^{\infty} \bar{C}_m (S_R \sin(\omega t + \varepsilon_R) - S_I \sin(\omega t + \varepsilon_I)) \end{aligned} \dots\dots\dots(2.17)$$



さらに,

$$\bar{C} = \sum_{m=1}^{\infty} \bar{C}_m \dots\dots\dots(2.18)$$

とおき, 式(2.16)を用いて, 式(2.17)を整理すると,

$$\eta_0 = a_R \cos(\omega t + \varepsilon_R) + a_I \cos(\omega t + \varepsilon_I) + \bar{C}X \dots\dots\dots(2.19)$$

速度関係式(2.12)の両辺に,  $\omega/\bar{A}$  を乗ずると,

$$\frac{\bar{A}}{\omega} \dot{X} = a_R \cos(\omega t + \varepsilon_R) - a_I \cos(\omega t + \varepsilon_I) \dots\dots\dots(2.20)$$

式(2.19)と(2.20)を辺々足して, 入射波を消去すると,

$$\frac{\bar{A}}{\omega} \dot{X} = 2a_R \cos(\omega t + \varepsilon_R) - \eta_0 + \bar{C}X \dots\dots\dots(2.21)$$

右辺の  $a_R \cos(\omega t + \varepsilon_R)$  は, 前後振動で造られた反射波  $\eta_R$  の  $x=0$  での波形であるので,

$$\dot{X} = \frac{\omega}{\bar{A}} (2\eta_{R,x=0} - \eta_0 + \bar{C}X) \dots\dots\dots(2.22)$$

式(2.22)の右辺には, 入射波  $\eta_I$  のような未知の値がない. すべての項は, 既知であるか, 直接的に検出が可能なものである. つまり, 目標反射波形  $\eta_R$  が与えられたときには, 波センサーで振動体前面の波面変動  $\eta_0$  を, また変位検出器で振動体変位  $X$  を検出し, 式(14)で計算される速度  $\dot{X}$  で振動体を制御すれば良い. このとき, 振動体は, 入射波  $\eta_I$  を消波し, 同時に反射波  $\eta_R$  を造波することが可能になる.

前後振動体前面の吸収パワーは, 造波された波(反射波)  $\eta_R$  がゼロのとき, 最大になる.

$$\dot{X} = \frac{\omega}{\bar{A}} (-\eta_0 + \bar{C}X) \dots\dots\dots(2.23)$$

上記はすでに吸収式造波機理論で証明されており, 国内外で多くの造波機に適用されている. 造波機の場合には, 造波水路の構造の制約により,  $\eta_0$  の波形しか検出できないため,  $\eta_0$  を用いた制御方法が一般的である.

しかし, 波力エネルギー変換の場合には, 波センサーが前後振動体の側面に設

置できるので、反射波  $\eta_R$  の影響を受けずに、入射波  $\eta_I$  のみを、検出することができる。式(2.20)を変形すると、

$$\frac{\bar{A}}{\omega} \dot{X} = a_R \cos(\omega t + \varepsilon) - a_I \cos(\omega t + \varepsilon) = \eta_{R,x=0} - \eta_{I,x=0} \dots\dots\dots(2.24)$$

$$\dot{X} = \frac{\omega}{A} (\eta_{R,x=0} - \eta_{I,x=0}) \dots\dots\dots(2.25)$$

速度制御を使用すると、前後振動体での反射率  $K_R$  を、簡単に制御することができる。

### 2.2.3 背面波がない場合の吸収パワー

吸収パワーの求め方として、二通りの方法がある。

ひとつは、振動板の仕事から計算する方法、もうひとつは、吸収される波パワーから計算する方法である。振動板のパワーは、速度ポテンシャルから振動板の前面および背面に働く流体圧を求めて、それに速度を乗ずれば計算できる。ここでは、簡便のため、波パワーから求めるものとする。

入射波、反射波の二種類の波の波高は、それぞれ以下のようなになる。

$$H_I = 2a_I \dots\dots\dots(2.26)$$

$$H_R = 2a_R \dots\dots\dots(2.27)$$

一般に、規則波のパワーは、周期を  $T$ 、波高を  $H_w$  とすると、

$$P = \frac{1}{32\pi} \rho g^2 H_w^2 T = 984 H_w^2 T (w/m) \approx 1.0 H_w^2 T (kW/m) \dots\dots\dots(2.28)$$

であるから、入射波を吸収し、かつ反射がある場合の波パワーは、以下のようになる。

$$P \cong H_I^2 T - H_R^2 T \dots\dots\dots(2.29)$$

$P$  が最大値となる場合は  $H_R = 0$  なので、式(2.25)は以下のとおり表すことができる。

$$\dot{X} = -\frac{\omega}{A}\eta_{I,x=0} \dots\dots\dots(2.30)$$

この制御式に従って、振動板を動かせば、波パワーの最大吸収が実現することになる。

### 2.2.4 背面波がある場合の吸収パワー

振動板の背面に水がある場合には、振動板が動くことによって、背後に透過波が作られる。この動作によって、背後にできる波は、

$$\eta_T = a_T \cos(\omega t + k_0 x + \varepsilon_T) = K_T a_I \cos(\omega t + k_0 x + \varepsilon_I) \dots\dots\dots(2.31)$$

$K_T=0$  のときには、振動板速度=0 となり、振動板は固定壁となる。この時、すべての入射波は、完全反射され、透過波はゼロになる。速度がゼロであるから、吸収できる波パワーもゼロである。また、 $K_T=1$  のときには、透過波と入射波が等しくなってしまう。このときには、振動板前面で得た波パワーは、振動板背面でそのまま放出されることがわかる。

このとき、振動板の速度は、

$$\dot{X} = -K_T S_I \omega \cos(\omega t + \varepsilon_I) \dots\dots\dots(2.32)$$

振動板表面では、この速度により、反射波が決定する。

$$\dot{X} = S_R \omega \cos(\omega t + \varepsilon_R) - S_I \omega \cos(\omega t + \varepsilon_I) = -K_T S_I \omega \cos(\omega t + \varepsilon_I) \dots\dots\dots(2.33)$$

$$\begin{aligned} S_R \omega \cos(\omega t + \varepsilon_R) &= S_I \omega \cos(\omega t + \varepsilon_I) - K_T S_I \omega \cos(\omega t + \varepsilon_I) \\ &= (1 - K_T) S_I \omega \cos(\omega t + \varepsilon_I) = K_R S_I \omega \cos(\omega t + \varepsilon_I) \end{aligned} \dots\dots\dots(2.34)$$

反射率と透過率の関係は、

$$K_R + K_T = 1 \dots\dots\dots(2.35)$$

背後に波を造る場合、反射率  $K_R$  をどう取れば、最大吸収となるのかを、考える。前項と同様に吸収波パワーを波パワーから求めるものとする、入射波、反射波及び透過波の三種類の波の波高は、以下のようなになる。

$$\begin{aligned}
 \text{入射波波高：} & H_I = 2a_I \\
 \text{反射波波高：} & H_R = 2a_R = 2K_R a_I \dots\dots\dots(2.36) \\
 \text{透過波波高：} & H_T = 2a_T = 2(K_R - 1)a_I
 \end{aligned}$$

規則波のパワーの式(2.28)を用いると、入射波を吸収し、かつ反射と透過がある場合の波パワーは、以下のようになる。

$$\begin{aligned}
 P & \cong H_I^2 T - H_R^2 T - H_T^2 T \\
 & = 4T(1 - K_R^2 - (1 - K_R)^2) a_I^2 = 8T(K_R - K_R^2) a_I^2 \dots\dots\dots(2.37)
 \end{aligned}$$

Pの最大値を与える  $K_R$  は、 $K_R - K_R^2$  を微分して極値を求めると、

$$1 - 2K_R = 0 \quad \therefore K_R = 0.5 \dots\dots\dots(2.38)$$

のときであり、そのときの吸収波パワーPは、

$$\begin{aligned}
 P & \cong H_I^2 T - H_R^2 T - H_T^2 T \\
 & = 4T(1 - 0.25 - 0.25) a_I^2 = 0.5 H_I^2 T \dots\dots\dots(2.39)
 \end{aligned}$$

となり、入射波パワーの最大50%を吸収できることが、わかる。

以上をまとめると、背面に波を造る場合、前面の反射率が  $K_R$  であると、透過率は  $1 - K_R$  となる。このとき、吸収パワーは、入射波パワー  $\times 2K_R(1 - K_R)$  となる。最大吸収は、反射率  $K_R = 0.5$  のときで、(振動板前面では入射波の半波高が反射し、背後で入射波の半波高が透過)、入射波パワーの50%である。(入射波パワーの1/4を反射波で失い、1/4を透過波で失う結果、吸収パワーは1/2となる)このときの制御式は、式(2.25)に、 $K_R = 0.5$  を加味して、

$$\dot{X} = -\frac{\omega}{A}(K_R - 1)\eta_{I,x=0} = -0.5\frac{\omega}{A}\eta_{I,x=0} \dots\dots\dots(2.40)$$

式(2.30)および(2.40)は、ここで提案する制御方法の基本式であり、入射波の波形と振幅比についての知見があれば、理想的なエネルギー吸収が可能であることを示している。

### 2.3 前後運動による共振

#### 2.3.1 運動方程式

ここまでの議論は、速度ポテンシャルによる吸収制御の証明であった。以下、同じ現象を、共振によって説明する。

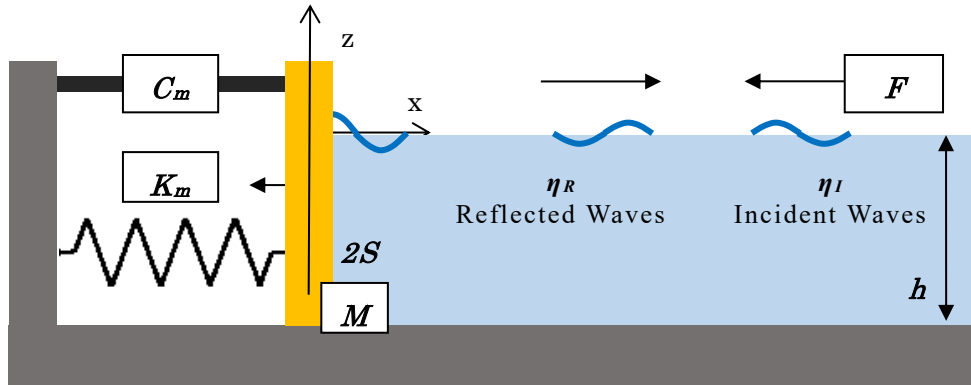


図 2.7 復元力のある前後振動板

上図の前後振動板は、強制振動と考えられる。これを、二次の運動方程式（ばねマスダンパー系）で記述する。もともとバネは存在しないので、発電機による仮想バネ  $K_m$  を想定すると、以下で表現できる。（以下、すべての力は、前後振動板の単位幅あたりで考える）

$$(M + M_{add} + \Delta M)\ddot{X} + C_m \dot{X} + K_m X = F \dots\dots\dots(2.41)$$

ここで、

$M$  : 振動体質量,  $M_{add}$  : 付加質量,  $\Delta M$  : 追加回転質量(フライホイール)等,

$C_m$  : 発電減衰(モータによる減衰),  $K_m$  : モータによるバネ定数,  $F$  : 波強制力

この式の、左辺第一項は、慣性力で加速度に比例、第二項は、減衰力で速度に比例、第三項は、復元力で変位に比例する。それぞれを別々に表記する。

$$F_I + F_D + F_R = F \dots\dots\dots(2.42)$$

$$F_I = M\ddot{X}, \quad F_D = C_m \dot{X}, \quad F_R = K_m X \dots\dots\dots(2.43)$$

定常状態では、以下が成り立つ。

$$F = f \cos \omega t \dots\dots\dots(2.44)$$

$$X = S \sin(\omega t - \varepsilon), \quad \dot{X} = S\omega \cos(\omega t - \varepsilon), \quad \ddot{X} = -S\omega^2 \sin(\omega t - \varepsilon) \dots\dots\dots(2.45)$$

$$-M'S\omega^2 \sin(\omega t - \varepsilon) + C_m S\omega \cos(\omega t - \varepsilon) + K_m S \sin(\omega t - \varepsilon) = f \cos \omega t \dots\dots\dots(2.46)$$

従って、この三つの力の特徴を、力-速度線図で表現すると次のようになる。

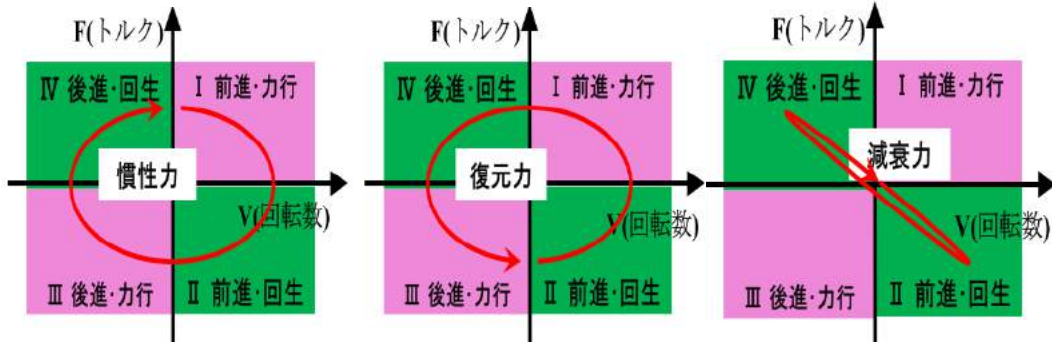


図 2.8 浮体の3つの力：慣性力(左)，復元力(中)，減衰力(右)

パワーは、力と速度の積である。上の三つの力のうち、慣性力と復元力が、一周期に行う仕事はゼロであり、減衰力のみが仕事を行う。慣性力と復元力は、一つのサイクルのうち、力行と発電を二回繰り返す、その合計はゼロになるためリアクティブ・パワーと呼ばれる。

このばねマスダンパー系が共振するとき、次の二つが同時に成り立つ

$$C_m \dot{X} = F \dots\dots\dots(2.47)$$

$$(M + M_{\text{add}} + \Delta M)\ddot{X} + K_m X = 0 \dots\dots\dots(2.48)$$

この式の意味することは、慣性力を復元力でキャンセルできるとき、共振が起こることである。

### 2.3.2 流体力

前後振動板の前面に、入射波のみが存在し、反射波が無い場合、速度ポテンシャルは、以下で表現できる。

$$\eta_{I,x=0} = a_I \cos(\omega t + \varepsilon_I) \dots\dots\dots(2.49)$$

$$\phi = \bar{A}S_I \frac{g \cosh k_0(z+h)}{\omega \cosh k_0 h} \sin(\omega t + k_0 x + \varepsilon_I) \dots\dots\dots(2.50)$$

このとき、振動板の位置と速度は、

$$X = -S_I \sin(\omega t + \varepsilon_I) \dots\dots\dots(2.51)$$

$$\dot{X} = -S_I \omega \cos(\omega t + \varepsilon_I) \dots\dots\dots(2.52)$$

振動板前面に働く流体圧を  $P$  とすると

$$p = \left[ \rho \frac{\partial \phi}{\partial t} - \frac{\rho q^2}{2} - \rho g z \right]_{x=0} \dots\dots\dots(2.53)$$

この中で、 $q^2$  は微小であるので、無視し、さらに静水圧分を抜いて変動圧のみで考えると、

$$p = \rho \frac{\partial \phi}{\partial t} \Big|_{x=0} = \bar{A}S_I \rho g \frac{\cosh k_0(z+h)}{\cosh k_0 h} \cos(\omega t + \varepsilon_I) \dots\dots\dots(2.54)$$

振動板幅あたりに作用する流体力は、 $x$  軸方向を正として、 $P$  を水深方向に積分する、

$$F = \int_{-h}^0 (-p) dz = -\bar{A}S_I \rho g \frac{\tanh k_0 h}{k_0} \cos(\omega t + \varepsilon_I) \dots\dots\dots(2.55)$$

前後振動板の造波減衰係数  $N$  は、流体力と速度から計算できる。

$$N = \frac{F}{\dot{X}} = \frac{\bar{A} \rho g}{\omega k_0} \tanh k_0 h \dots\dots\dots(2.56)$$

### 2.3.3 背面波がない場合の共振

背面に水がないとき、発電減衰を、造波減衰に等しくとれば共振するので、式(2.47)より、

$$\dot{X} = \frac{F}{C_m} = \frac{F}{N} = -\frac{\omega}{A} \eta_{I,x=0} \dots\dots\dots(2.57)$$

発電機がこの式の数値に従って運転するとき、運転に必要なトルクは、モータ



-発電機が負担することになる。つまり、(慣性力+復元力)がゼロになるよう、電氣的仮想バネ  $K_m$  が自動的に調整されることになる。

### 2.3.4 背面波がある場合の共振

背面に水があるとき、発電減衰と造波減衰が存在するので、

$$\dot{X} = \frac{F}{N + C_m} \dots\dots\dots(2.58)$$

発電パワーは、速度と発電減衰力の積になるので、

$$P = C_m \dot{X} \cdot \dot{X} = C_m \frac{F^2}{(N + C_m)^2} \dots\dots\dots(2.59)$$

この式を微分して、 $P$  が最大になる極値を求めると、

$$C_m = N \dots\dots\dots(2.60)$$

$$\dot{X} = \frac{F}{2N} = -\frac{\omega}{2A} \eta_{I,x=0} \dots\dots\dots(2.61)$$

発電機がこの式の数値に従って運転するとき、運転に必要なトルクは、モータ-発電機が負担することになる。つまり、式(2.48)がゼロになるよう、電氣的仮想バネ  $K_m$  が自動的に調整されることになる。

### 2.3.5 前後振動体の吸収と共振

前後振動の場合、吸収の概念に従って求めた制御式(2.30), (2.40)と、共振の概念に沿って求めた制御式(2.57), (2.61)は、それぞれ同一であることがわかる。この制御式を、前後振動体における最適速度制御方法と呼ぶことにする。

以上より、結論として、前後運動の吸収と共振とは、同じ現象であると言える。

## 2.4 上下運動による吸収

### 2.4.1 上下振動体の形状

浮力を持った浮体を使用する上下振動体は，波力発電機として，最も良く使用される形状である．

以下の検討は，下図の円柱状振動体で考えるものとする． $x$  軸を水路右方向に， $z$  軸を水面から上方向にとるものとする．質量調整は，振動体の固有周期を調整するために，ドラフトを変更することなく，上昇体の質量を増加させるためのものである．

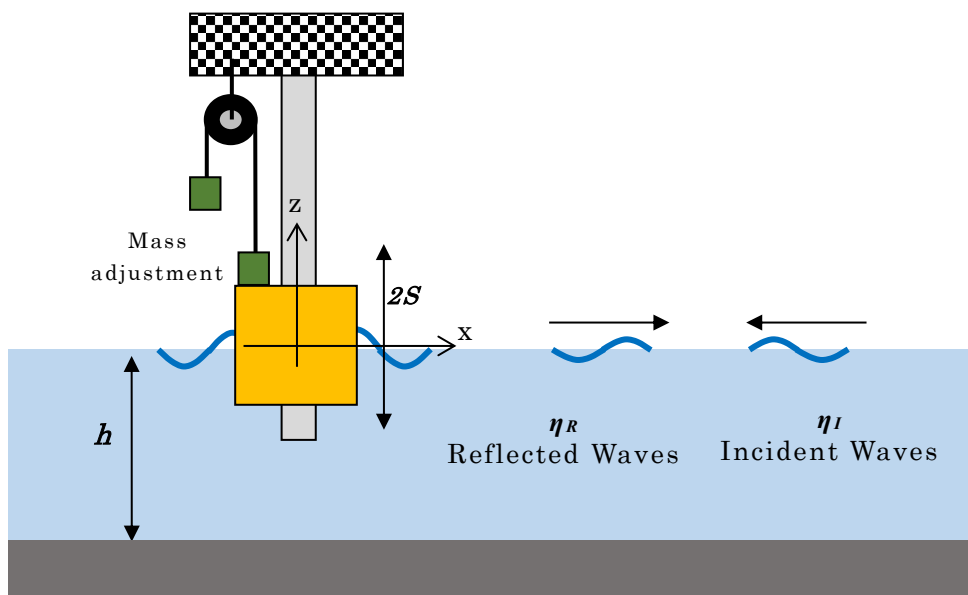


図 2.9 上下振動体の動き

上下運動での，振動体の動きと振動体右側の波の関係は，振動体が図の下側に押すときに，波の山の部分が作られ，上側に引くときに波の谷が作られる．これは，振動体の左側でも，同じ位相の現象になる．

すなわち，この座標系の取り方によって，振動体が正方向に動くとき波面は負方向に，振動体が負方向に動くとき波面は正方向に動く．これは前後振動体とは，逆の関係になっているため，制御式にも影響を与えることになる．

吸収運転時の入射波形，上下振動体変位，上下振動体速度は，

$$\eta_{I,x=0} = a_I \cos(\omega t + \varepsilon_I) \dots\dots\dots(2.62)$$

$$Z = S_I \sin(\omega t + \varepsilon_I) \dots\dots\dots(2.63)$$

$$\dot{Z} = S_I \omega \cos(\omega t + \varepsilon_I) \dots\dots\dots(2.64)$$

### 2.4.2 造波と消波

前後運動型(背面波有り)と対比しつつ、上下運動型の造波と消波特性を見る。

連続の式から、造波の基本的な動作は、最大波高のとき最大速度で押すことがわかる。

$$\text{前後振動体の造波： } \dot{X} = \dot{X}_{\max} \text{ at } \eta = \eta_{R,x=0,\max} \dots\dots\dots(2.65)$$

$$\text{上下振動体の造波： } \dot{Z} = -\dot{Z}_{\max} \text{ at } \eta = \eta_{R,x=0,\max} \dots\dots\dots(2.66)$$

また消波の基本的な動作は、最大波高が来ると最大速度で逃げることである。

$$\text{前後振動体の吸収： } \dot{X} = -\dot{X}_{\max} \text{ at } \eta = \eta_{I,x=0,\max} \dots\dots\dots(2.67)$$

$$\text{上下振動体の吸収： } \dot{Z} = \dot{Z}_{\max} \text{ at } \eta = \eta_{I,x=0,\max} \dots\dots\dots(2.68)$$

つまり、上下運動型の造波・消波は、前後運動型と比較すると、180°位相が異なることになる。

すなわち、前後運動型の式

$$\text{造波と吸収の制御式： } \dot{X} = \frac{\omega}{A} (2\eta_{R,x=0} - \eta_{I,x=0}) \dots\dots\dots(2.69)$$

$$\text{吸収のみの制御式： } \dot{X} = -\frac{\omega}{A} \eta_{I,x=0} \dots\dots\dots(2.70)$$

に倣うと，上下運動型では，

$$\text{造波と吸収の制御式： } \dot{Z} = -\frac{\omega}{A}(2\eta_{R,x=0} - \eta_{L,x=0}) \dots\dots\dots(2.71)$$

$$\text{吸収のみの制御式： } \dot{Z} = \frac{\omega}{A}\eta_{L,x=0} \dots\dots\dots(2.72)$$

前後振動板と比べて，上下振動体の場合には，速度ポテンシャルを分析的に解くことは難しい．しかし，上記の  $\bar{A}$  は，数値計算や実験により，容易に求められる．

### 2.4.3 パワー吸収

以上は，振動体前面に来る波の消波方法についてである．パワー吸収について考えると，振動体の背面に水がある場合には，前面での消波運動が，背面での造波運動と同じパワーになり，差し引きがゼロという結果になってしまう．

これを考慮すると，入って来る波の 50%を吸収し，25%を反射，背面で 25%の造波（透過と言っても良い）を行うときに最大パワー吸収となる．この最大パワー吸収を与える制御式は，以下のようなになる．

$$\text{前後振動体の場合： } \dot{X} = -\frac{\omega}{2\bar{A}}\eta_{L,x=0} \dots\dots\dots(2.73)$$

$$\text{上下振動体の場合： } \dot{Z} = \frac{\omega}{2\bar{A}}\eta_{L,x=0} \dots\dots\dots(2.74)$$

## 2.5 上下運動の共振

### 2.5.1 運動方程式

上下振動体の場合には，浮力によるバネ力があるため，上下振動体の運動方程式は，下図に示すような，ばねマスダンパー系の運動方程式で記述できる．

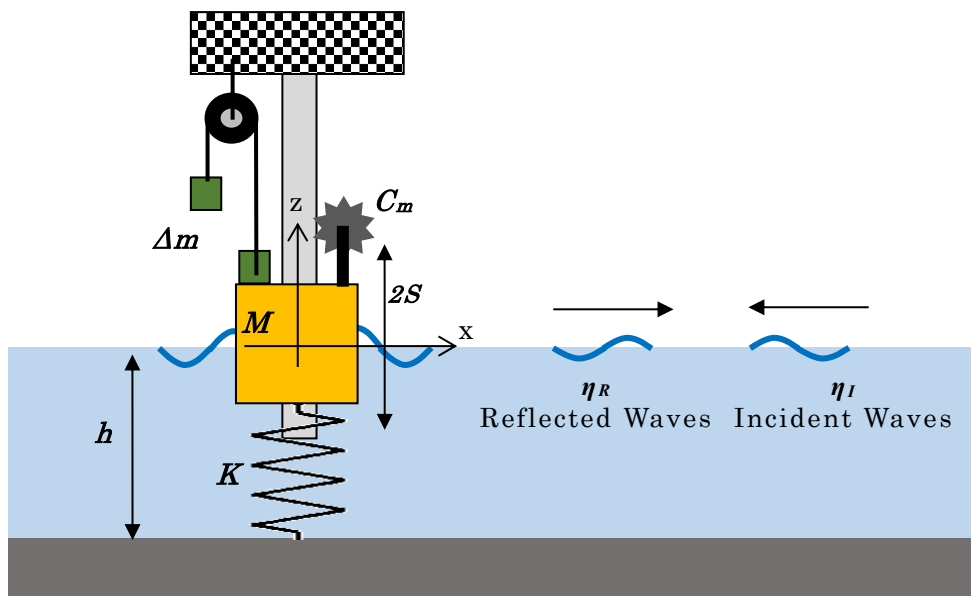


図 2.10 上下振動体の動作

さらに，一般化したモデルで表現する．

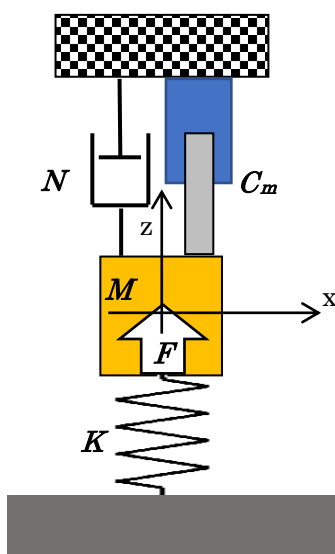


図 2.11 モータ兼発電機を含んだばねマスダンパー系

このとき、基本式は、以下で表現できる。

$$(M + M_{add} + \Delta M)\ddot{Z} + (N + C_m)\dot{Z} + (K + K_m)Z = F \quad \dots\dots\dots(2.75)$$

ここで、 $Z$  は、浮体の位置、 $M$  は浮体の質量、 $F$  は波強制力、ラディエーション抵抗は、線形理論によって、線形の付加質量  $M_a$  と、造波減衰係数  $N$  に分解できる。ばね定数または静水圧の復元力係数は、 $K = \rho g A_w$  ( $A_w$  は水線面積) である。

共振を引き起こして、吸収電力を最大化するためには、2つの外部パラメータ、 $\Delta M$ 、 $C_m$ 、 $K_m$  を最適化する必要がある。 $\Delta M$  は、フライホイールなどの補助質量、 $C_m$  は発電機減衰係数、 $K_m$  は発電機による電気ばね定数である。

システムが共振するとき、Eq. (2.75) を2つの式に分けることができることがわかっている。

$$(M + M_{add} + \Delta M)\ddot{Z} + (K + K_m)Z = 0 \quad \dots\dots\dots(2.76)$$

$$(N + C_m)\dot{Z} = F \quad \dots\dots\dots(2.77)$$

$$\dot{Z} = \frac{F}{N + C_m} \quad \dots\dots\dots(2.78)$$

吸収パワーは、力と速度の積であるので、平均吸収パワーは、

$$P = \frac{1}{2} C_m \dot{Z} \cdot \dot{Z} = \frac{1}{2} C_m \left( \frac{F}{N + C_m} \right)^2 \quad \dots\dots\dots(2.79)$$

(6.5) 式を微分することにより、最大値を見つけるために、 $P$  は、次の条件で最大限になる。

$$C_m = N \quad \dots\dots\dots(2.80)$$

$$P_{max} = \frac{F^2}{8N} \quad \dots\dots\dots(2.81)$$

したがって、波から最大電力を取り込む速度条件は、

$$\dot{Z} = \frac{F}{N + C_m} = \frac{F}{2N} \dots\dots\dots(2.82)$$

上下振動体が入射波長に比べて小さい場合、波強制力  $F$  は波面高さに比例し、

$$F = \rho g A_w \eta_{I,x=0} \dots\dots\dots(2.83)$$

$$N = \frac{F}{\dot{Z}} = \rho g A_w \frac{a_I}{S_I \omega} = \frac{\bar{A}}{\omega} \rho g A_w \dots\dots\dots(2.84)$$

$$\dot{Z} = \frac{F}{2N} = \frac{\rho g A_w}{2N} \eta_{I,x=0} = \frac{\omega}{2A} \eta_{I,x=0} \dots\dots\dots(2.85)$$

### 2.5.2 上下振動体の吸収と共振

上下運動の場合、吸収の概念に従って求めた制御式と、共振の概念に沿って求めた制御式は、いずれも式(2.74)となり、同一であることがわかった。このことから、上下運動の吸収と共振とは、同じ現象であると言える。

この制御式を、上下振動体における最適速度制御方法と呼ぶことにする。



## 2.6 仮説の証明：吸収と共振は等価である

### 2.6.1 最適速度制御

前後振動体と上下振動体について、速度ポテンシャル理論に基づいて導いた吸収制御式と、強制振動理論に基づいて導いた共振制御式とを検討した結果、同じ制御式になることが得られた。

すなわち、振動体背面にも水面がある場合の最適速度制御式は、以下のようになる。

$$\text{前後振動体の場合： } \dot{X} = -\frac{\omega}{2A} \eta_{I,x=0} \dots\dots\dots(2.73)$$

$$\text{上下振動体の場合： } \dot{Z} = \frac{\omega}{2A} \eta_{I,x=0} \dots\dots\dots(2.74)$$

モータ-発電機の世界速度制御は、すでに確立した技術があり、十分な性能を持った市販のものが使用できる。発電機が指令速度に従って運転するとき、運転に必要なトルクは、その速度指令に従うためにモータ-発電機が自動的に負担することになる。

つまり、上下運動の場合には、次の二つの式の内、式(2.77)が満足させられると、その裏で、式(2.76)が成り立つように、 $K_m$  が選ばれ、電氣的仮想バネ  $K_m$  が自動的に調整されることになる。(この力  $K_m Z$  は、速度制御を行う上で必要な力として、モータが引き受けることになる。)

$$(M + M_{add} + \Delta M)\ddot{Z} + (K + K_m)Z = 0 \dots\dots\dots(2.76)$$

$$(N + C_m)\dot{Z} = F \dots\dots\dots(2.77)$$

この方法の最大利点は、入射波形  $\eta_{I,x=0}$  と  $\omega/(2A)$  が既知であれば良いということである。

### 2.6.2 力制御の検討

Falnes が、共振制御をリアクティブ制御と名付けたのは、リアクティブな力  $K_m$  を制御しようという発想に基づいている。最適なバネ定数を求めれば、周期が選択できるという考えによるものである。

この考え方に沿って、モータ-発電機の力制御を使う方法について検討する。(強制振動の運動方程式の各項が力であるため、力制御がふさわしいように見える。) 前述のように、共振が起こっている時には、次の二つが成り立っている。

$$(M + M_{add} + \Delta M)\ddot{Z} + (K + K_m)Z = 0 \dots\dots\dots(2.76)$$

$$(N + C_m)\dot{Z} = F \dots\dots\dots(2.77)$$

この式の中で、モータ-発電機が担う力を取り出すと

$$F_m = C_m \cdot \dot{Z} + K_m \cdot Z \dots\dots\dots(2.86)$$

であるので、この二つの力を正確に与えれば、共振が起きることになる。

このうち、 $C_m$  は、

$$C_m = N \dots\dots\dots(2.80)$$

によって準備できる。 $K_m$  は、

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{M + \Delta M}{K + K_m}} \dots\dots\dots(1.5)$$

より、

$$K_m = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 (M + \Delta M) - K \dots\dots\dots(2.87)$$

で求めることができる。

しかし、この方法には、二つの問題点がある。

最大の問題は、この  $T$  をどう選ぶかである。たとえば過去 30 分程度の解析から、代表的な周期を選ぶことが考えられる。しかし、実際の波は不規則波であり、周期 5 秒から 15 秒程度までの、種々の周波数成分を含んでいる。もし共振状態にあるならば、式(2.89)を満たす  $K_m$  は時間ごとに多様に変化していると思われる。これに反して、式(2.91)では、ひとつの  $K_m$  しか選べない。もし刻々の  $K_m$  が誤差を持つと、式(2.89)が成り立たなくなると、共振条件が満たされなくなる可能性がある。

もうひとつの問題は、外力  $F$  が制御に生かされないことである。この系にとって、エネルギーの源泉は波強制力  $F$  であり、それと共振させるのが目的である。にもかかわらず、その情報が、制御式(2.86)に含まれていないことは、制御的には遠回りになっており、失敗を生む可能性が大きい。

この制御ループをまとめると、

- ① 波によって、浮体が動く
- ② 浮体の位置、速度が決まる
- ③  $C_m$  と  $K_m$  から、 $F_m = C_m \cdot \dot{Z} + K_m \cdot Z$  を計算する
- ④ その力を、発電機に与える
- ⑤ 発電機の力と波の力で、浮体が動く

ということの繰り返しになる。

この 0.1 秒程度のループの中で、 $K_m$  の算定がずれると、

- 発電機からの力  $F_m$  が狂い、
- 浮体の位置・速度が本来の位置からずれる
- いつまでも安定した共振状態に入れない

という可能性がある。

### 2.6.3 最適速度制御と力制御の比較

以上の議論から、二つの制御法を比較する

速度制御では、浮体速度が波に比例して動かされるので、積分値である浮体位置は、必ず波に対して  $\pi/2$  だけ遅れる。これは、確実に共振を引き起こす、もし係数に誤差があると、下図の周波数応答曲線が上下にずれることになるが、左右にずれることはない。

これに対して、力制御では、 $K$  の誤差で左右にずれを生む可能性がある。共振曲線には強いピークがあるので、制御誤差に対しては、上下にずれる方がよい結果を生むと考えられる。

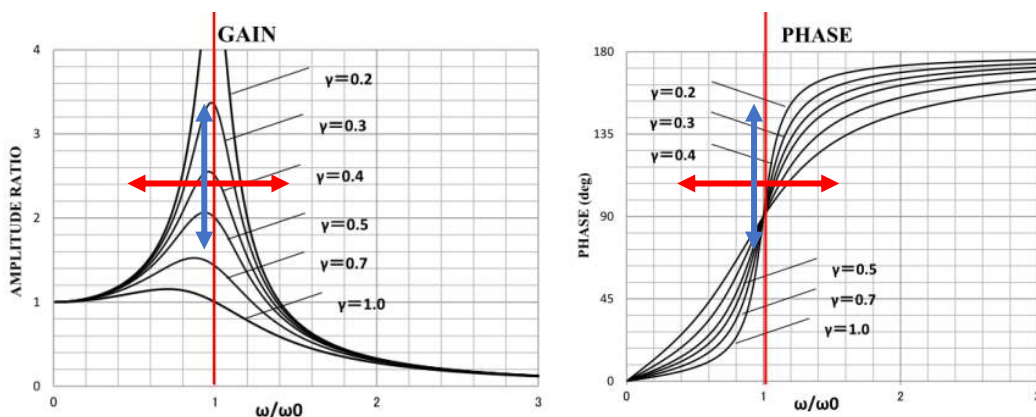
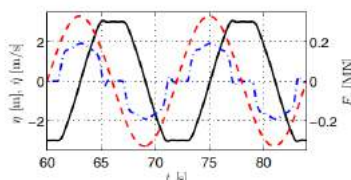


図 2.12 速度制御の制御誤差（青）と力制御の制御誤差（赤）

二つの制御法と準最適制御とされるラッチング制御との比較を次表に示す。

表 2.1 各種制御方式の比較

	最適速度制御方式	力制御方式	その他(ラッチング制御)
概要	発電機の速度を制御し、共振状態にすることで、浮体幅以上の波エネルギーを抽出する方式	発電機のトルクを制御し、共振状態にすることで、浮体幅以上の波エネルギーを抽出する方式	ラッチング機構により疑似共振状態にすることで、波が持つエネルギーをより多く抽出
運動方程式	$(M + m)\ddot{Z}(t) + (N + C_m)\dot{Z}(t) + (K + K_m)Z(t) = F(t)$ <p>Z: 浮体上下変位, M: 浮体質量, m: 付加質量, N: 浮体減衰係数, C<sub>m</sub>: 発電負荷, K: 復元力係数, K<sub>m</sub>: 発電機による付加バネ係数, F: 波強制力.</p> <p>同調の条件は,</p> $(M + m)\ddot{Z}(t) + (K + K_m)Z(t) = 0$ $(N + C_m)\dot{Z}(t) = F(t)$ <p>固有周期 <math>T_0 = 2\pi\sqrt{(M + m)/(K + K_m)}</math></p>		浮体が上で停止した時に、クランプし、波が下がったときにリリースする。一番下の位置でもクランプし、波が上がった時にリリースする。ピーク位置を知る必要があるため波予測も使用する。リリース方法には各種がある
制御式など	$\dot{Z}(t) = K_A \cdot \eta(t)$ <p>浮体の速度の位相と波面の位相を一致(浮体変位は波面から <math>\pi/2</math> 遅れ)させる制御</p>	$F_m(t) = C_m \dot{Z}(t) + K_m Z(t)$ <p>浮体の振動周期と、来襲が予測される波の周期を見て <math>km</math> を直接変える方式で発電機トルクを制御する</p>	 <p>赤の点線は励起力 <math>F_e</math>, 青の点線は浮体速度 <math>v = \dot{\eta}</math>, 黒線は浮体の上下位置 <math>\eta</math> を表している。</p>
長短所	<p>疑似共振現象を起こすことになるため、発電効率の向上が期待できる。大波高、長周期においては、大きなモータ(兼発電機)パワーが必要になる。</p> <p>波高計などで得られた波形情報が制御に生かせるので正確に制御できる。</p>	<p>波高計を使わないため、来襲している波を正確に予測するのが難しい。</p>	<p>連続的な制御ではない。不規則波においてはクランプ及びリリースするタイミングが難しい。クランプする機構にも留意が必要である。</p>

### 2.6.4 機械的共振

波浪中での上下振動体の共振を阻む最大のものは、水の巨大な浮力である。以下に示すように円筒体が水中に浮遊している場合、

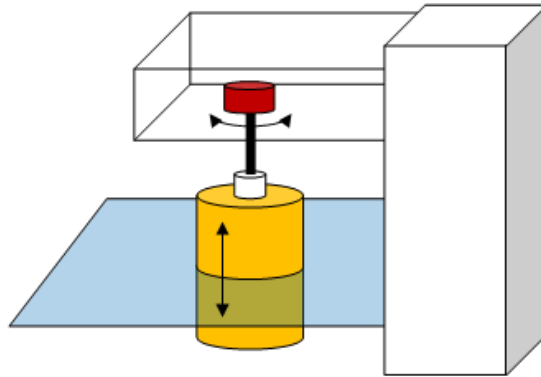


図 2.13 慣性質量付き円柱浮体

水に浮かせた円柱にかかる復元力（浮力－重量）は、バネ力として働く。ばね定数  $K$  は、円柱断面積  $A_w$  を用いると

$$K = \rho g A_w \dots\dots\dots (2.88)$$

ここで、 $g$  : 重力加速度  $9.8\text{m/sec}^2$ 、 $\rho$  : 水の密度  $1000\text{kg/m}^3$

浮体の質量  $M$  は、円柱断面積  $A_w$  と喫水（水没深さ） $d$  により、以下のよう  
に表現できる。

$$M = \rho A_w d \dots\dots\dots (2.89)$$

浮体の固有周期は、水中であることから、付加質量 10% を加味すると、

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{M + M_{add}}{K}} = 2\pi \sqrt{\frac{1.1M}{K}} = 2\pi \sqrt{\frac{1.1 \cdot \rho A_w d}{\rho g A_w}} = 2\pi \sqrt{\frac{1.1d}{g}} \dots\dots\dots (2.90)$$

この式から、円柱の直径に関係なく、固有周期は、喫水が 1m のとき 2.1 秒、喫水が 4m のとき 4.2 秒、喫水が 9m のとき 6.2 秒となる。海洋波の周期は 5～15sec。浮体の固有周期が波の周期と同じ時には、共振が起こり、大きなエネルギーを取り出せるが、円柱が非現実的な長さになってしまうことが

わかる。

もう一度，固有周期の式を見る。

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{M + \Delta M}{K + K_m}} \dots\dots\dots(1.5)$$

固有周期を長くする方法としては，発電機により， $(K+K_m)$ を小さくする方法と，フライホイールなどを使用して， $\Delta M$ （追加回転質量）を増加させる方法が考えられる。発電機による方法は，より大きな発電機を必要とするため，コストに与えるデメリットがある。一方で， $\Delta M$ による方法には，まだ連続的に調整する有効な手段がない。自動車で使用されているような無段減速機ができれば，それが可能になるであろうが，現状は，二つの方法を併用するのがベストと思われる。

ただし，現実の問題としては，変化する波の状況に応じて段階的にフライホイールの重さや速度を変化させ，最適速度制御と併用する方法が望ましいと思われる。

### 2.6.5 造波と吸収の関係

波の造波と吸収は，強制振動問題である。造波と吸収の違いは，原因と結果が逆になっていることである。造波の外力は電力で，造波板を通じて，波という結果を生む。吸収の外力は波で，吸収体を通じて，発電という結果を生む。

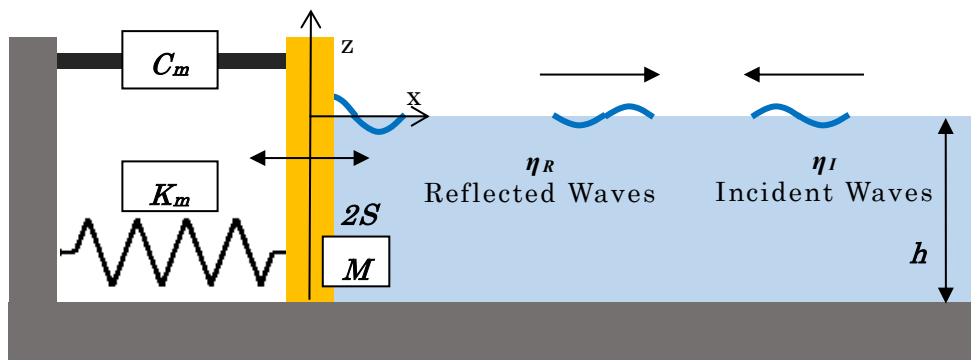


図 2.14 波の吸収と波の発生

まず，入射波が吸収されるとき運動方程式を考える。



外力は、波強制力であり、それが、発電減衰力で相殺される。造波板などを加速するための慣性力は、発電機の発生する復元力によりキャンセルされる。重たい造波板の慣性力をキャンセルするには、巨大な復元力が必要である。しかし復元力が一周期で行う仕事はゼロであり、エネルギー的な損失はない。

$$F_I + F_D + F_R = F_{WAVE} \dots\dots\dots(2.91)$$

$$F_I = M\ddot{X} \quad F_D = C_m\dot{X} \quad F_R = K_m X \dots\dots\dots(2.92)$$

$$\dot{X} = \frac{F_{WAVE}}{C_m} = \frac{F_{WAVE}}{N} = -\frac{\omega}{A}\eta_{I,x=0} \dots\dots\dots(2.93)$$

次に、造波板で、造波するときの運動方程式を考える。外力は、発電機による駆動力であり、それが、造波減衰力を生む。この場合も造波板などを加速するための慣性力は、発電機の発生する復元力が引き受けることになる。

$$F_I + F_D + F_R = F_{DRIVE} \dots\dots\dots(2.94)$$

$$F_I = M\ddot{X} \quad F_D = N\dot{X} \quad F_R = K_m X \dots\dots\dots(2.95)$$

$$\dot{X} = \frac{F_{DRIVE}}{N} = \frac{\omega}{A}\eta_{R,x=0} \dots\dots\dots(2.96)$$

式(2.91.)と(2.94)を、比べてみる。Falnes が言う通り、「消波することは、造波することである」とはこのことを示している。

## 2.7 制御システム的设计

### 2.7.1 制御アルゴリズム

上下振動体で考える．式は以下の形になる．

$$\dot{Z} = \frac{\omega}{2A} \eta_{l,x=0} \dots\dots\dots (2.74)$$

このブロック図はきわめてシンプルに表現できる．演算内容も容易であるため,0.1秒間隔で十分制御可能である．

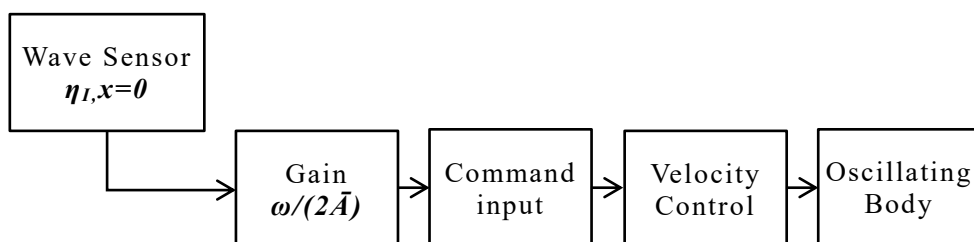


図 2.15 制御ブロック図

ポイント・アブソーバは，浮体寸法に比べて，波長が十分長いことを前提にしている．入射波の波形は，下図のように，浮体の反射の影響が少ない浮体の前部両側面で計測し，浮体の影響の少ないものを使用するのが望ましい．

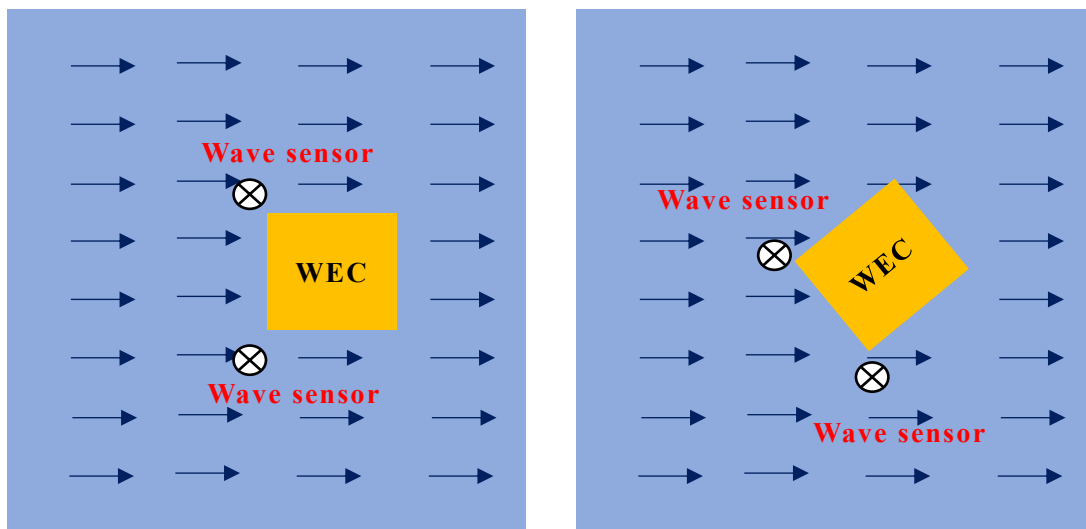


図 2.16 波センサーの取付位置

### 2.7.2 係数 $\omega/\bar{A}$ の算定

実証試験で使用する箱型浮体形状について、発散波振幅比  $\bar{A}$  を数値計算で求めた。(小林他, 1974)

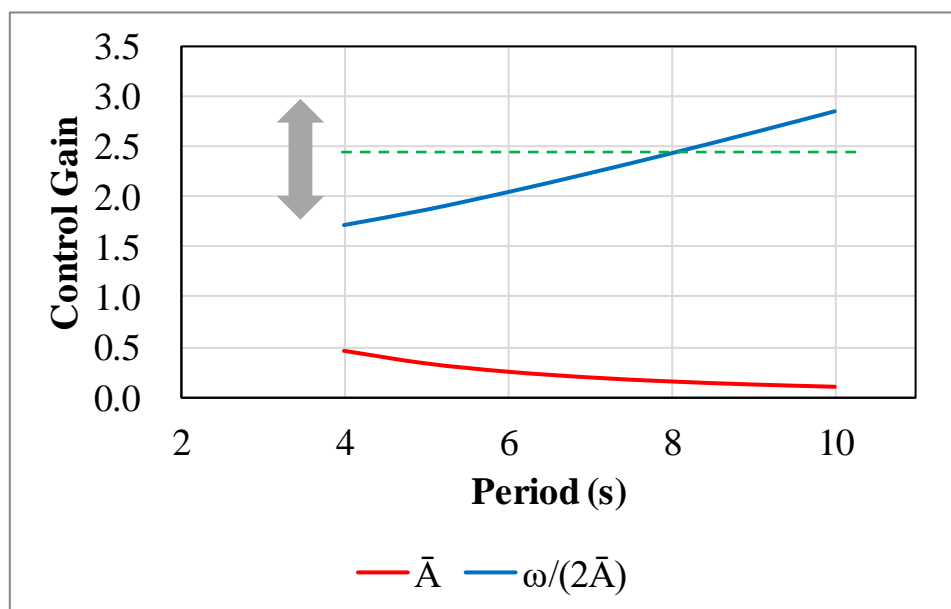


図 2.17 制御係数  $\omega/(2\bar{A})$  の理論値

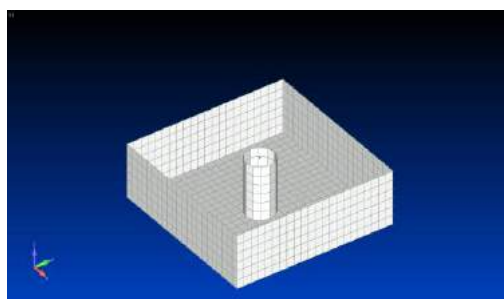


図 2.18 箱型浮体形状 (2.5m×3.2m×1.5m)

$\omega/(2\bar{A})$  の値は、周期 4s~10s の範囲で、1.7~2.9 の値である。ただし、これはあくまで計算値であるので、実際の海象にあわせて、チューニングするのが妥当であろう。

2.7.3 係数  $\omega/\bar{A}$  の近似誤差による影響

図 2.17 に見るように、 $\omega/\bar{A}$  は一定値ではないが、制御するには、近似値を使うしかない。

波力発電での影響を調べる。前述したごとく、式(2.74)は、半波高分 50%を反射させ、半波高分 50%を透過させるという意味で、 $\omega/(2\bar{A}) = 0.5 * \omega/\bar{A}$  としている。透過率を、 $K_T$  (0~1.0) として、式を書き換えると

$$\dot{Z} = K_T \frac{\omega}{A} \eta_{L,x=0} \dots\dots\dots(2.97)$$

において、 $K_T=0.0$  のときには、 $\dot{Z}=0$  となって、浮体は固定され、直立壁として完全反射し、 $K_T=1.0$  のときには、前で完全吸収した分だけ背面で造波する。いずれの場合でも、パワー吸収はできないことがわかる。

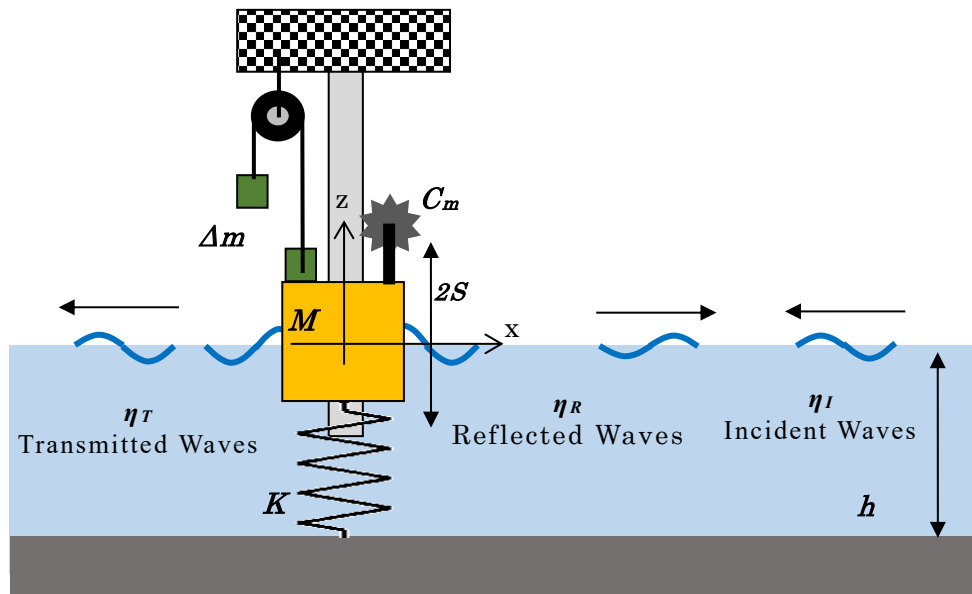


図 2.19 入射波，反射波および透過波

このことから、 $\omega/\bar{A}$  が真値より大きいと、透過大，反射小となり、逆に  $\omega/\bar{A}$  が真値より小さいと透過小，反射大という結果になることがわかる。

誤差が取得パワーに与える影響を見る。本来，取得できる最大パワーは

$$\begin{aligned} P &\cong H_I^2 T - H_R^2 T - H_T^2 T \\ &= 4T a_I^2 \cdot (1 - 0.5^2 - 0.5^2) = 0.5 H_I^2 T \dots\dots\dots(2.39) \end{aligned}$$

より，50%であるが，誤差があるときについて考察する。

ここで、図 2.17 より、 $\omega/2\bar{A}=2.2 \times (0.7 \sim 1.3)$ であるから 2.2 を使用すると  $\pm 30\%$  の誤差となる。

30%反射が多いときには、30%透過が少ないので、本来

$$50\% \text{ 反射} + 50\% \text{ 透過} : P \cong 4Ta_1^2 \cdot (1 - 0.5^2 - 0.5^2) = 0.5H_1^2T$$

であるべきところが、

反射波高は、 $0.5 \times 1.3 = 0.65$ 、透過波高は、 $0.5 \times 0.7 = 0.35$  より

$$65\% \text{ 反射} + 35\% \text{ 透過} : P \cong 4Ta_1^2 \cdot (1 - 0.65^2 - 0.35^2) = 0.455H_1^2T$$

結局、波高で 30%の誤差はエネルギーでは、 $0.455/0.5 = 91\%$

捕捉エネルギーは、9%しか低下しない。

さらに誤差が大きいときでも

$$80\% \text{ 反射} + 20\% \text{ 透過} : P \cong 4Ta_1^2 \cdot (1 - 0.8^2 - 0.2^2) = 0.32H_1^2T$$

つまり  $K_T \cdot \omega / \bar{A}$  が、誤差によって、1.6 倍になった場合、反射波振幅は、本来の 50%から 80% ( $0.5 \times 1.6$ ) まで大きくなるが、パワー吸収は、本来の  $0.32/0.5 = 64\%$  まで取得できることを意味しており、誤差にも強いと言える。

近似値を使用する点は、造波機でも同じであるが、不規則波実験においても実用上十分な性能であると報告されている。(平口他, 1988)

## 第3章 模型試験

### 3.1 予備実験

#### 3.1.1 三角断面浮体

模型実験を行うに当たっては、波向きを選ばないということから、前後振動ではなく、上下振動型を選択した。

浮体の形状として、模型実験で、まず取り上げたのは三角形断面の浮体である。この形状は、造波機としても多くの実績があり、当然のことながら、最適速度制御法による優れた吸収性能の確認ができた。

ただこの形状は、波向き依存性が大きいいため、円柱形の浮体に変更することとした。

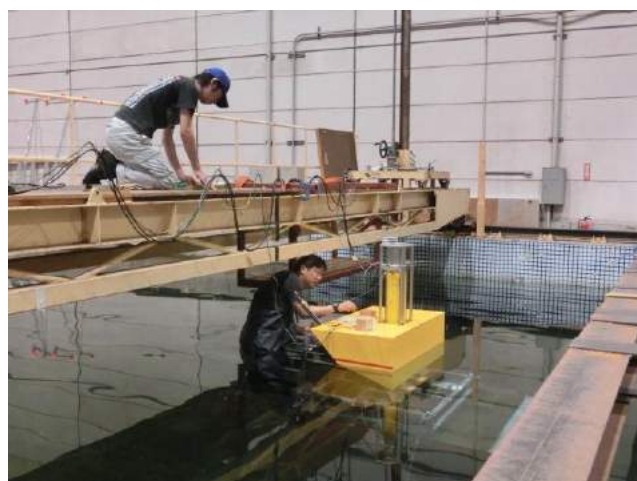
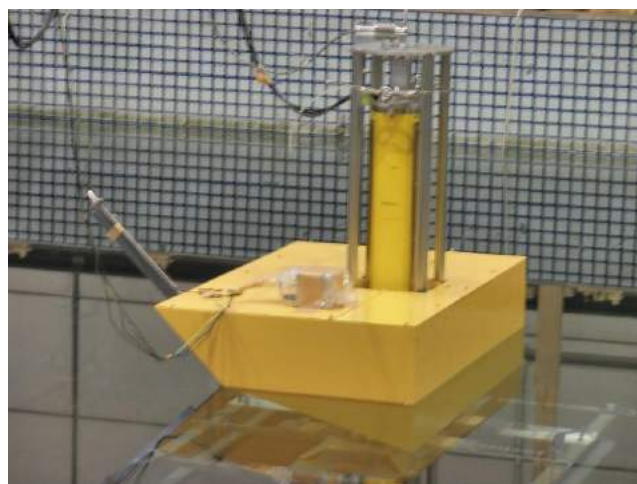


図 3.1 三角断面形状を持つ浮体による吸収運転：前面に波高計を搭載



### 3.1.2 円柱浮体

波向き依存性が無い軸対称浮体として、一番シンプルな円柱を選択し、実験水槽と実海域で実験した。この浮体には発電機にフライホイールを組み込み、その増減によって、浮体の固有周期が変化できることも併せて実験した。



図 3.2 円柱浮体による吸収運転

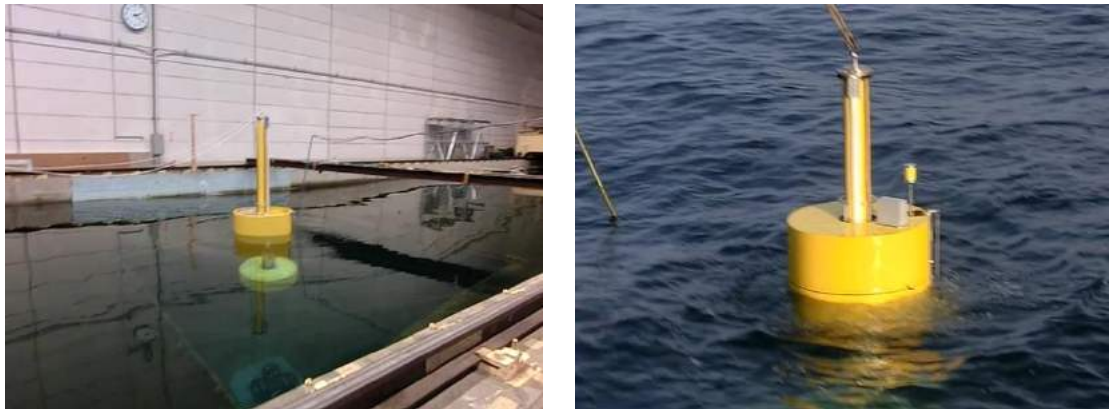


図 3.3 円柱浮体による吸収運転

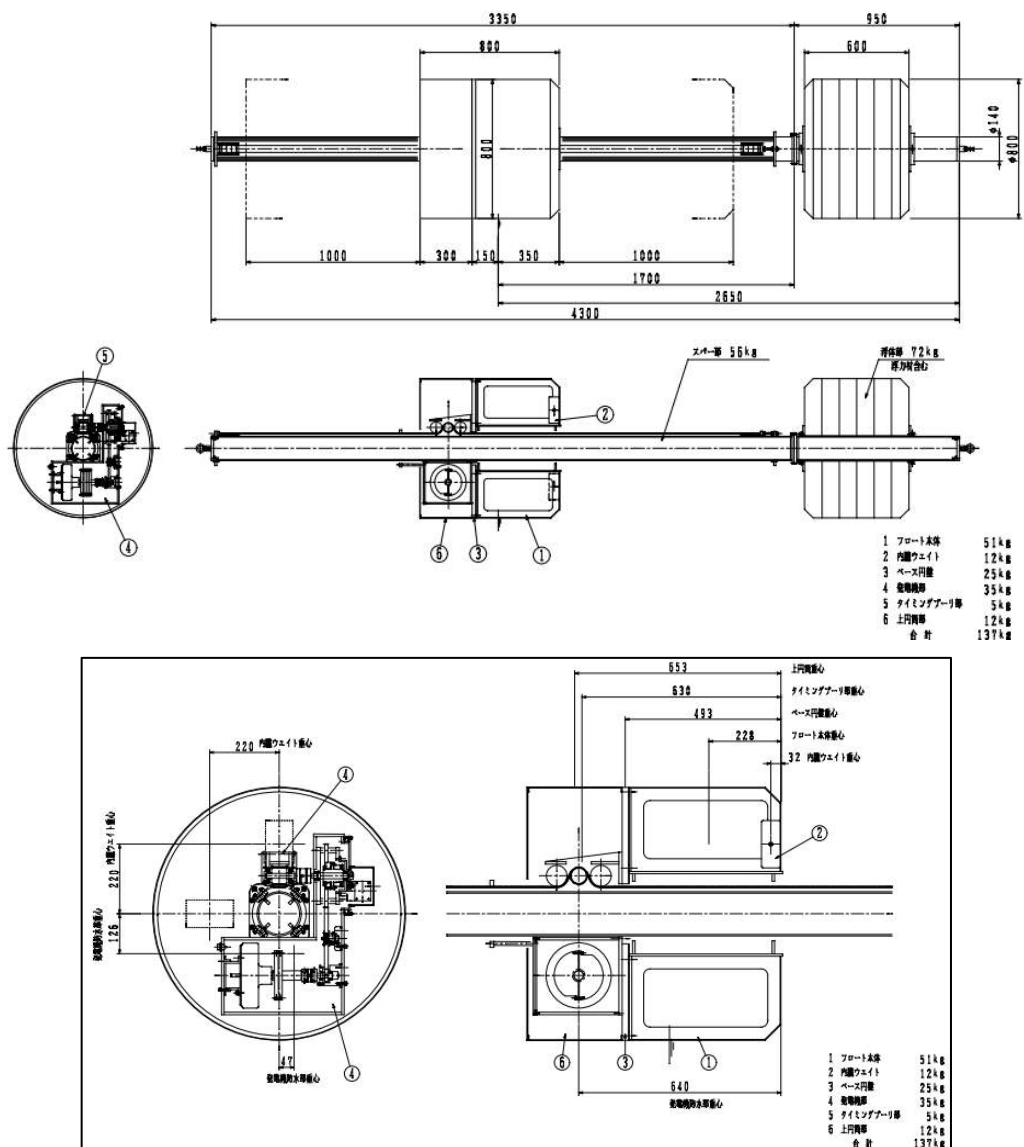


図 3.4 円柱浮体の形状：全体(上)，浮体およびフライホイール(下)



図 3.5 浮体内部の発電機とフライホイール





図 3.6 作業許可申請書 設置箇所位置図

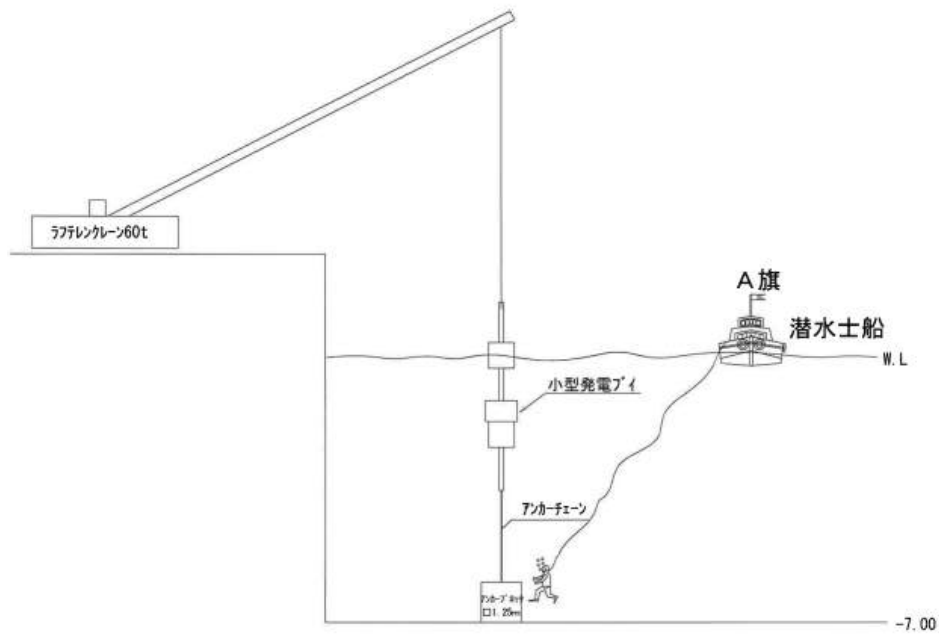


図 3.7 施工要領図

### 3.1.3 箱型浮体

波力発電の普及のために、コストは極めて重要な要素である。円筒の鉄パイプは、直径2mまでは、標準製品であるが、それ以上のものは特注となり、極めて高価である。

製造コスト的に不利な円柱浮体に比べて、箱型浮体は、組立・溶接が容易である。ポイント・アブソーバ効果が期待できる浮体は、本来、円柱などの軸対称断面を持つものであるが、箱型浮体でも同様な効果が期待できるのではないかと考えた。

後述の水槽試験により、方向依存性がなく円柱と遜色がないことが確認されたため、下に示す図の形状で、沿岸部の海底に固定された係留杭と上下運動する箱型浮体で構成するものとした。

箱型浮体寸法が、幅2.5m×奥行3.2m×喫水1.5mであるのは、事前の水槽実験で、水線面の断面積が小さいと、上下運動量が過大になることがわかったため、この寸法が海洋波の周期に耐えうる最小であろうと判断したことによる。

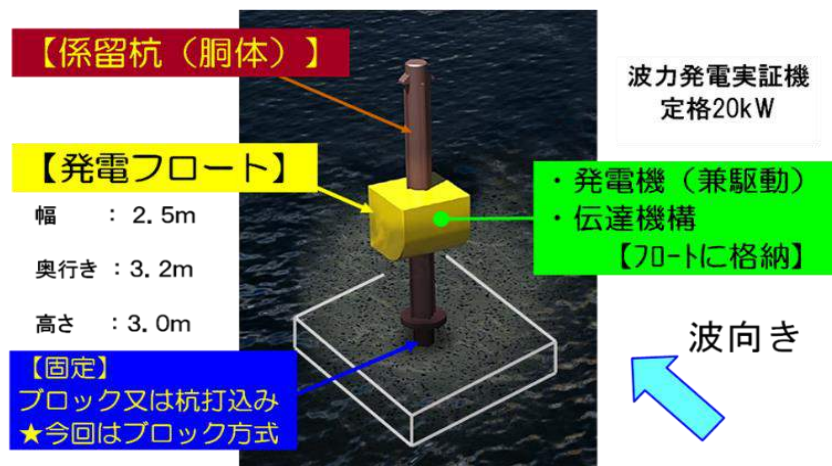


図 3.8 箱型浮体の形状

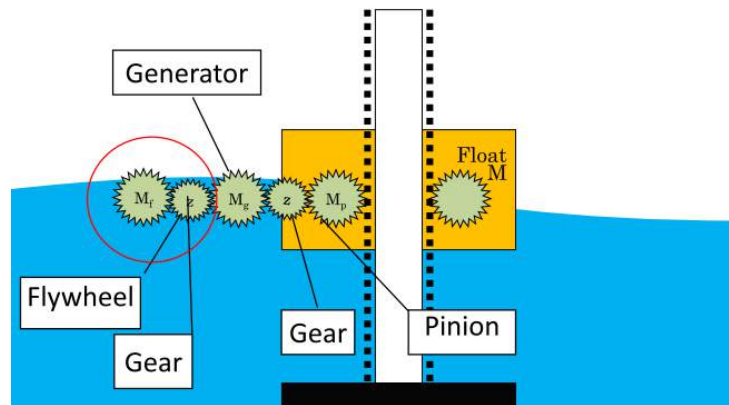


図 3.9 箱型浮体の駆動機構

## 3.2 性能確認実験

### 3.2.1 最適速度制御の確認

水槽模型実験は極めて重要である。実海域では、任意の波を発生することはできない。波の有無も、波の周期も波高も、その日の天気任せでしかない。基本特性を調べるのに規則波が不可欠であるが、実海域で規則波に巡り合うことはあり得ないのである。

このために、大洗港での実証に先立ち、1/5 スケール模型による水槽試験を実施した。模型は実証機と同じく、動力伝達にラックアンドピニオン方式を採用し、浮体内部に駆動と回生を兼ねたサーボモータを内蔵している。最適速度制御は、浮体横に設置した波高計の情報を利用している。まず図.3-5のように模型の正面から単一方向の波高 0.2m（実機 1.0m）の規則波をあて、最適速度制御による吸収運転を行った。

図3-6は共振状態（浮体変位が波に対して $\pi/2$ だけ遅れ、波の振幅の2倍近くまで動く）を示しており、図 は、その時の積算発電量を示している。これはまさに、Falnes が示した最適制御（リアクティブ制御）の波形そのものであり、最適速度制御法の正しさを証明していると言える。

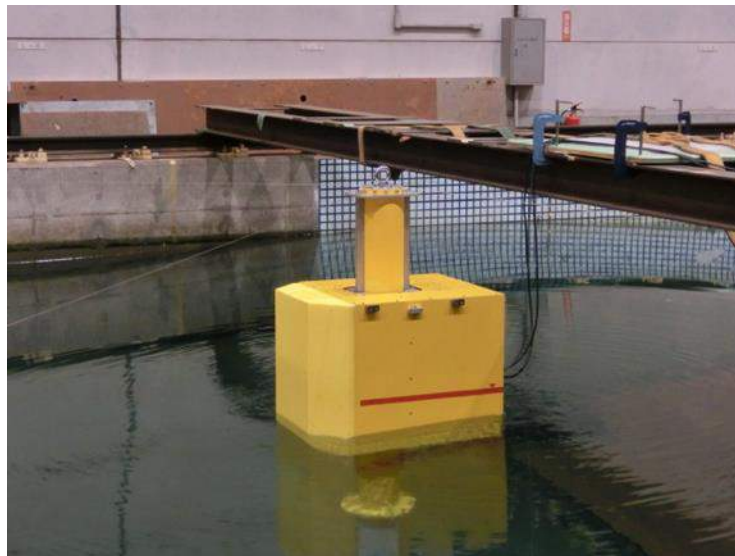


図 3.10 箱型浮体の模型実験

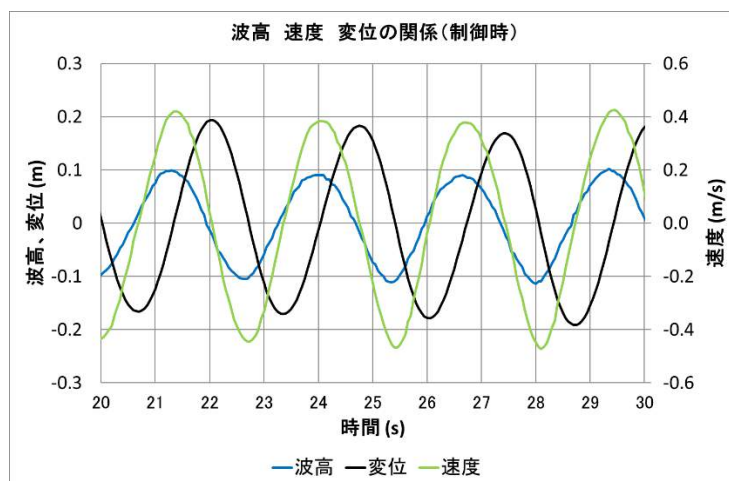


図 3.11 入射波波形と浮体の変位・速度の関係

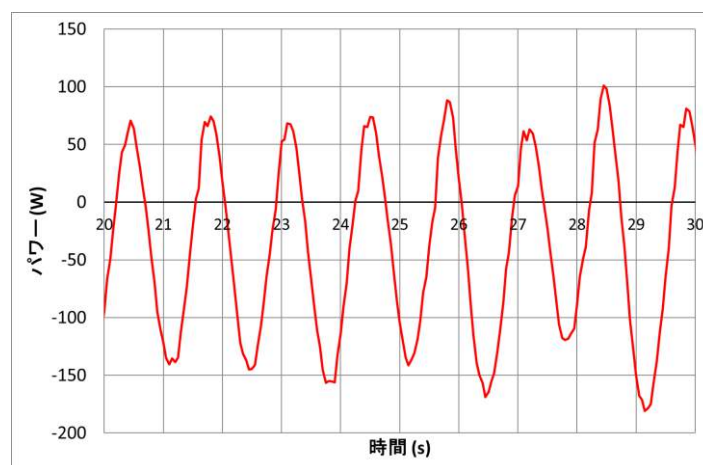


図 3.12 発電パワー（プラス側：力行，マイナス側：回生）

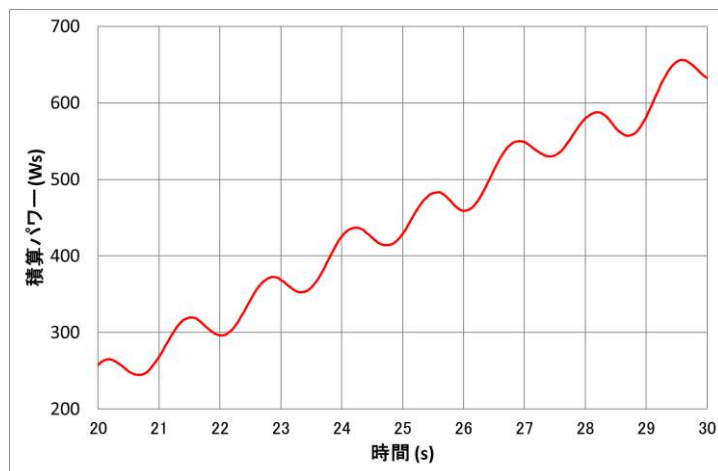


図 3.13 積算パワー (J=ws)



### 3.2.2 捕捉幅比による性能評価

前述したポイント・アブソーバ効果は、多くの研究者が見出している。すなわち軸対称浮体が上下振動するとき、吸収可能な最大パワーは、(波長/2π)の幅の入射波パワーに等しいので、これを最大捕捉幅とする。

$$C_{\max} = \frac{P_{\text{abs.max}}}{P_w} = \frac{1}{k_0} \equiv \frac{\lambda}{2\pi} \dots\dots\dots(3.1)$$

これに対し捕捉幅は、実際に捕捉したパワー入射波パワーに対する平均吸収パワーの比である

$$C = \frac{P_{\text{abs}}}{P_w} \dots\dots\dots(3.2)$$

さらに、この捕捉幅Cと装置の幅Bで、捕捉幅比 (**CWR**) が定義される。

$$CWR = \frac{P_{\text{abs}}}{P_w \cdot B} \dots\dots\dots(3.3)$$

Babarit および Hals は、多くの装置の年間平均キャプチャ幅比は、調べている。それによると、(Babarit and Hals, 2011)

- 振動水柱装置は 33%
- 上下振動ブイは 10~30% (大きいブイでは、より大きい)
- ピッチング板は 20~40% (海底設置装置は平均 40%)、
- オーバートッピング装置は平均 15%

という。

水槽実験で、箱型浮体に正面から規則波をあて、捕捉幅比の実験を行ったところ、以下の結果を得た。捕捉幅比が1以上のところは、自分の幅以上の波パワーを捕捉できており、きわめてよい効率であるように思える。

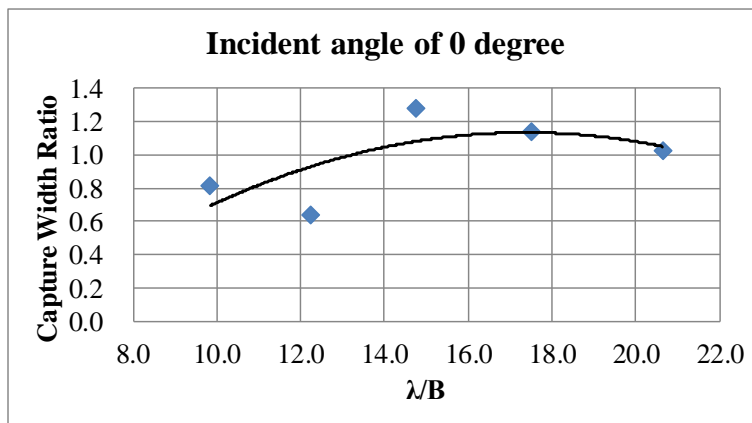
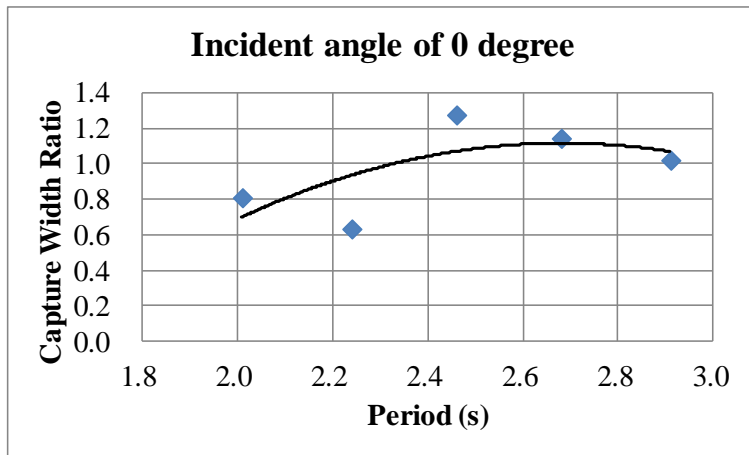


図 3.13 正面入射波に対する捕捉幅比 (CWR)

### 3.2.3 入射角影響の確認

前節と同じ波を，浮体の斜め45度から当てて角度依存性を確認した．

捕捉幅比の結果は，正面からの波の場合と，ほぼ同じ結果（図3.9）を得た．さらに不規則波を用いて，正面と斜め45度の両方で試験を行った結果，直方体浮体で波向き影響が見られなかったため，実証機も同じ．箱型形状で進めることとなった．

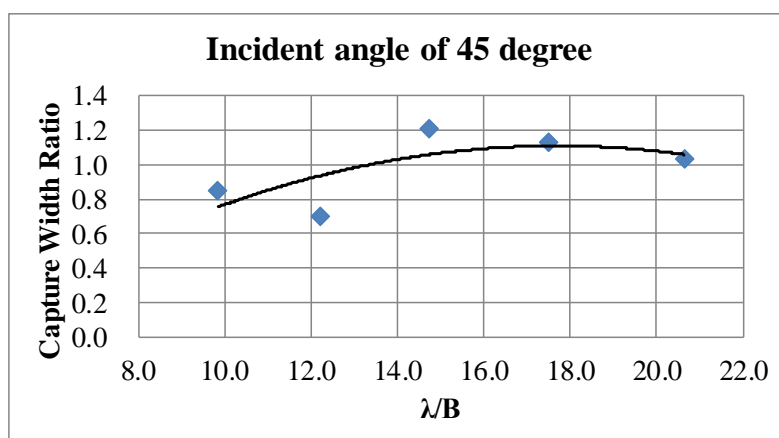
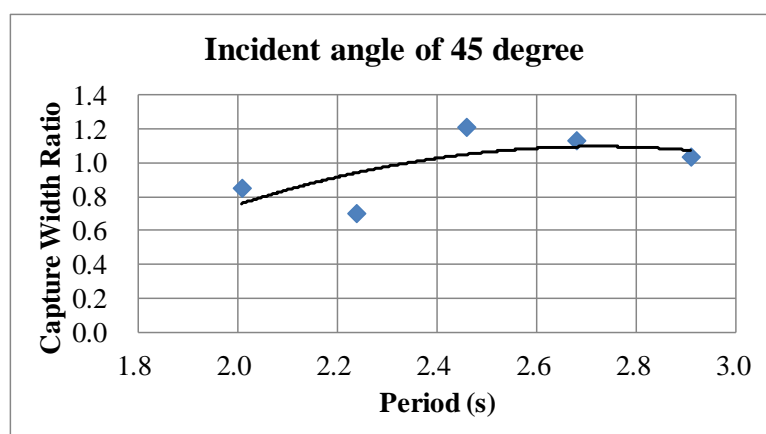


図 3.14 斜め入射波に対する捕捉幅比 (CWR)

## 第4章 実証試験

## 4.1 基本計画

### 4.1.1 浮体および発電機

使用した波力発電実証試験機の諸元は、以下の通りである。

- 設置部水深 7m
- 浮体寸法 幅 2.5m, 奥行き 3.2m, 高さ 3m
- 発電機容量 定格 10kW×2 台
- 発電機トルク 定格 50Nm×2 台
- 発電機回転数 定格 2000RPM
- 浮体最大推力 約 10kN×2 台
- 浮体最大速度 約 1m/s

日本近海の波パワーは、おおむね単位幅（1m）あたり 7～10kW とされている。箱型浮体の幅を 2.5m としたので、18～25kW の波パワーの入射波が期待できる。これから発電機は、10kW×2 台とした。

この発電機は、短時間では、200%の出力（20kW）まで許容できるが、この実証では、最大 160%で運転することとした。

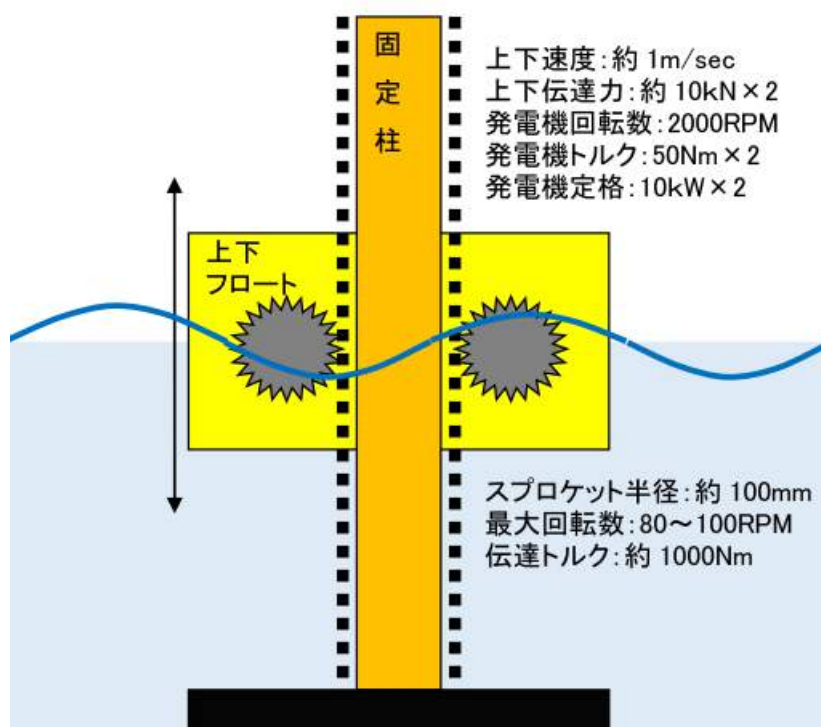


図4.1 浮体と発電機の設計

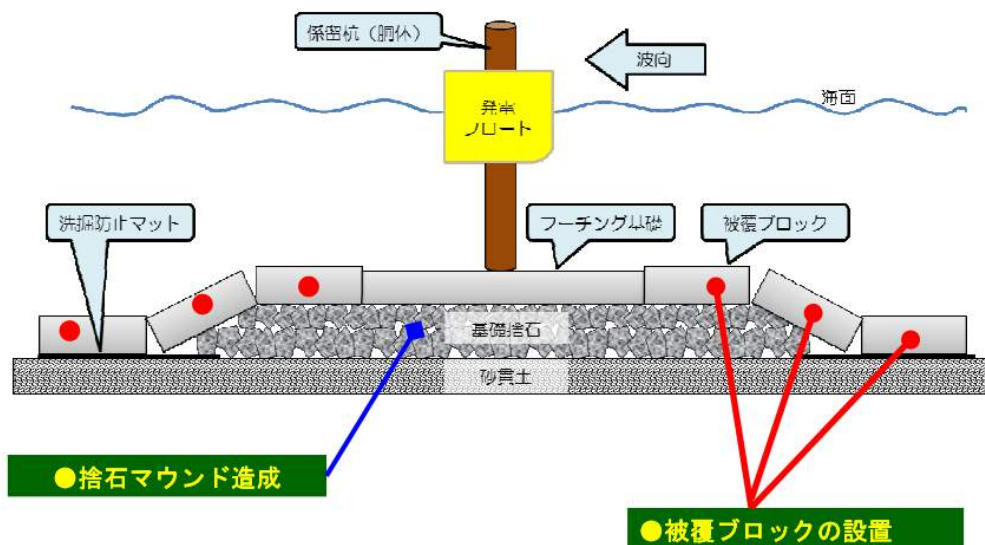


図4.2 基礎工事：捨石マウンドと被覆ブロック



図4.3 10kWモータ発電機および減速機

(Kawaguchi, 2018; Miyajima, 2016; Miyajima, 2015)

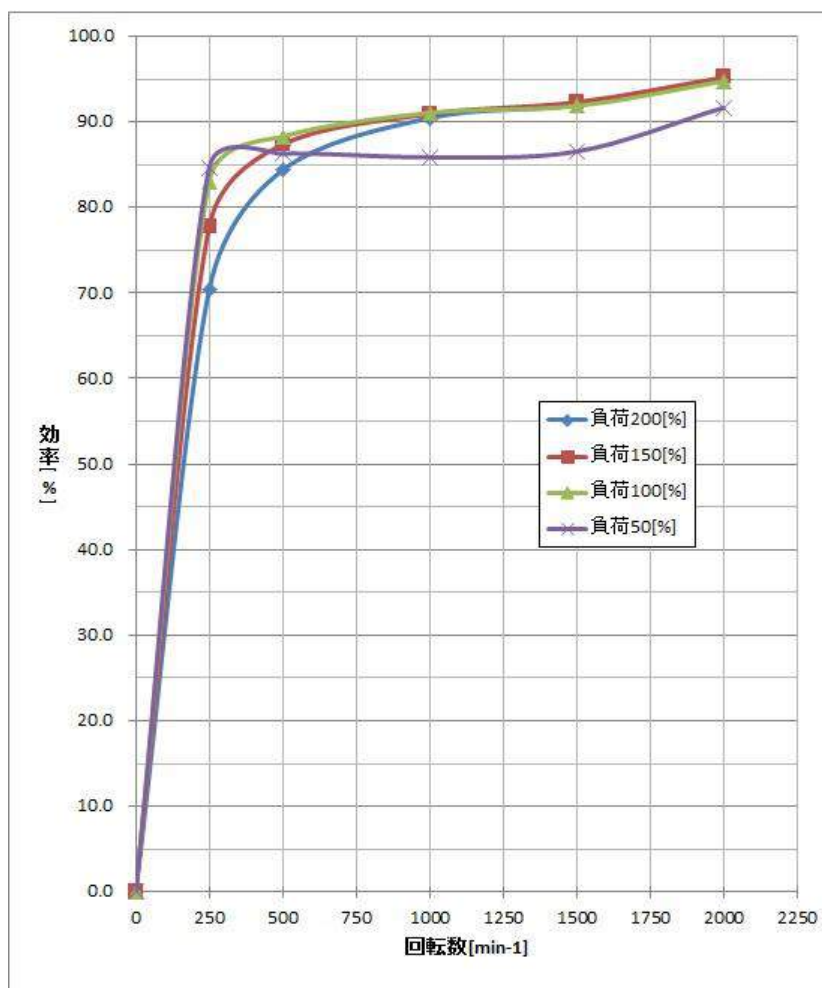


図4.4 10kWモータ発電機の性能曲線



図4.5 浮体上下位置センサーと波センサー（圧力計）





波センサー  
取付位置

図4.6 波センサーの取付



図4.7 操作用PC



### 4.1.2 沈降システム

第1章で述べたように、波力発電の普及を妨げている理由は、大きく分けて二つ。一つは、性能面での問題、もう一つは、耐久性である。

日本という場所に設置する以上、台風は避けられない。その台風を避けるための手段として、浮体を沈降させる方法を選んだ。浮体のほぼ下半分をバラスト室として、そこに水を貯めて沈め、台風が去った後、浮体の上半分に搭載したコンプレッサにより、バラスト水を排水させる仕組みである。

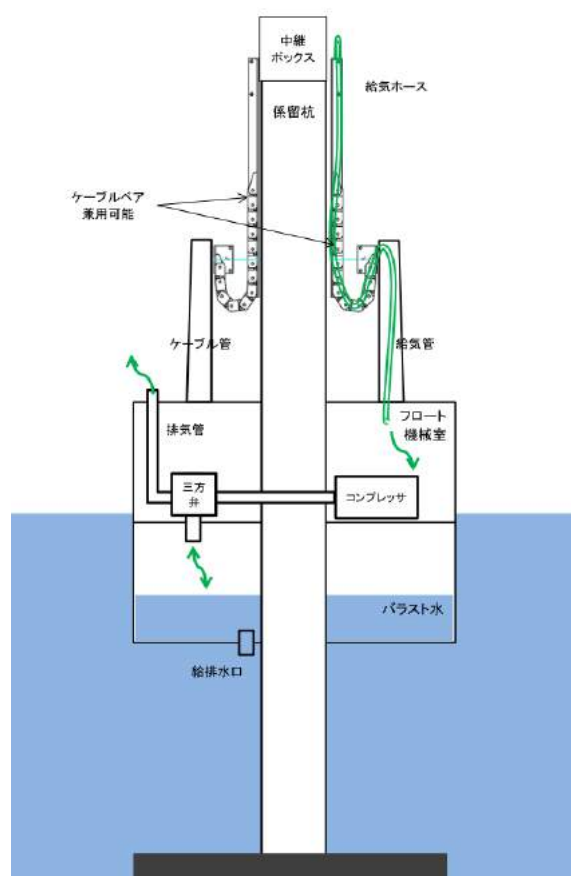


図4.8 浮体とバラストタンク

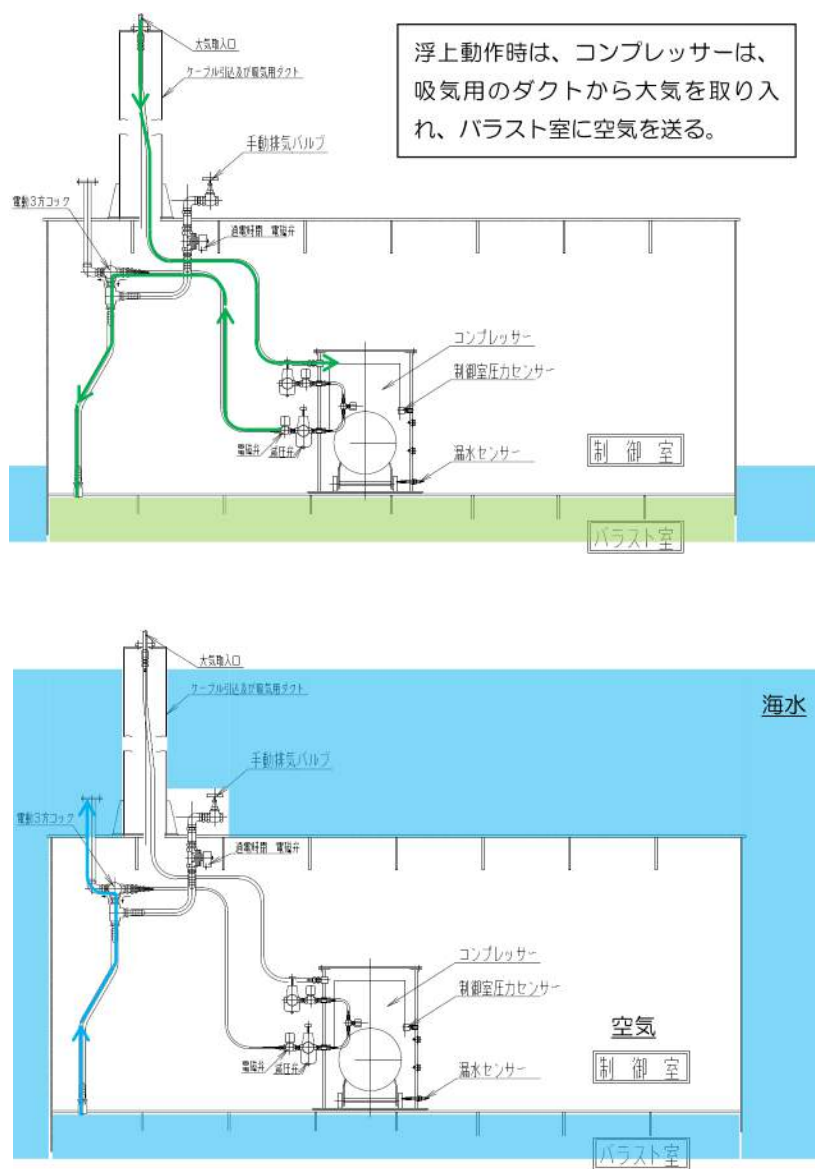


図4.9 バラスト水の注水と排水による沈降システム

## 4.2 設置作業

### 4.2.1 本体設置作業

茨城県にある大洗港の防波堤の外側約100m、水深約7mの場所に、入射波の代表的な波向きを考え、東向きに設置した。(図参照)



図4.10 大洗設置場所および防波堤との関係

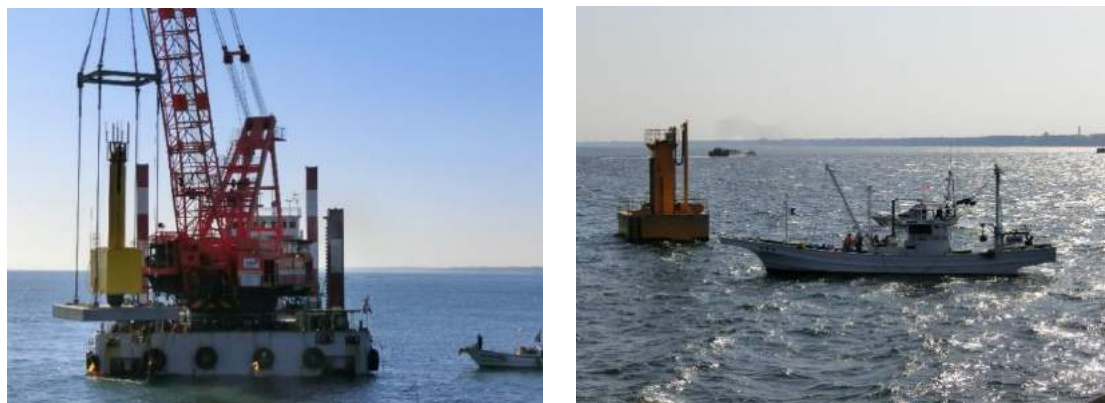


図4.11 本体設置作業



図4.12 沈降システム確認運転：浮上（左） 沈降(右)

#### 4.2.2 陸上機器設置作業



図4.13 制御盤設置作業

## 4.3 性能運転

### 4.3.1 浮体の固有周期

まず浮体を制御せず，フリーの状態に入射波形と浮体の上下動データを計測し，周波数応答を求めると，図4.14のようになった。

これからこの浮体の固有周期は，約4sで，振幅倍率は約1.8となっていることがわかる。

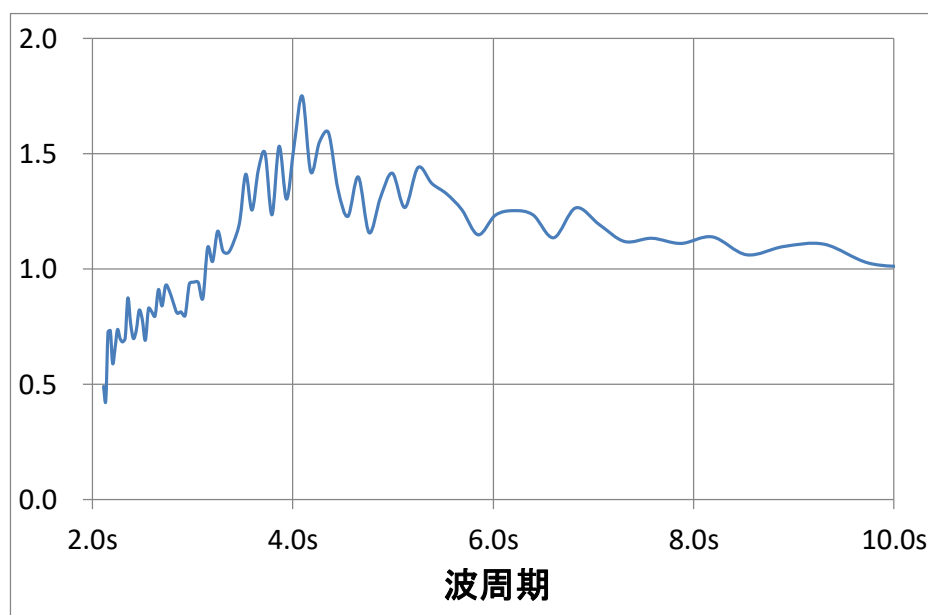


図4.14 浮体の周波数応答 振幅特性

### 4.3.2 最適速度制御と抵抗制御

図 4.15 から図 4.23 は，特定の 1 時間から 30s (0.1s×300 個) を抽出したもので，左縦軸は kW，右縦軸は kW/s である．(変位，水位の単位は，m で，左縦軸 kW と共用する)

最適速度制御は，高効率であるが，大波高時に使用すると，共振振幅が過大になる恐れがある．そのような時には，発電機をブレーキとしてのみ使用する従来型の抵抗制御を使用した方が安全である．最適速度制御と抵抗制御の切り替えは瞬時で，停止する必要はない

図 4.15 のデータは，前半 15s 最適速度制御運転した後，瞬時に切り換えが行われ，後半 15s は抵抗制御運転によっている．最適速度制御では，発電 kW の線がマイナスになる部分(力行運転)が見える．この結果，図中の矢印で示すように，波に対して浮体の位置が  $\pi/2$  だけ遅れ，共振が引き起こされている．抵抗制御では，発電パワーがマイナスになることがなく，浮体位置も波に対して遅れることはないが，共振がないため，発電量は小さい．

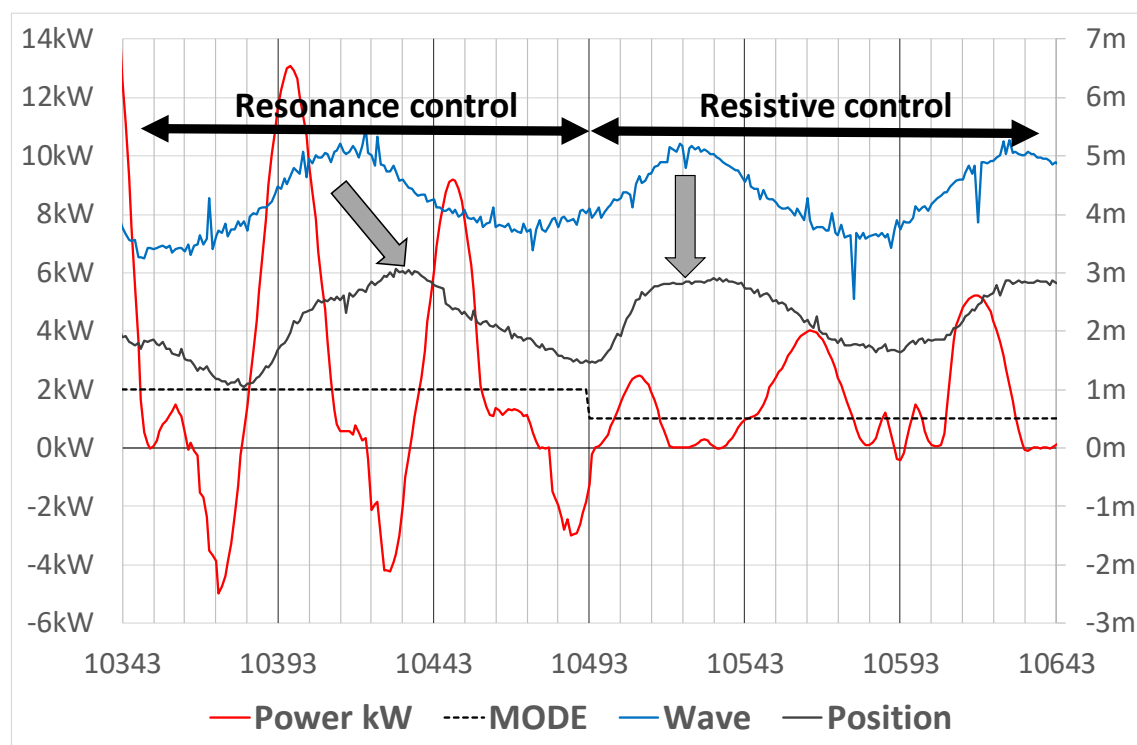


図4.15 最適速度制御と抵抗制御の違い

### 4.3.3 最適速度制御による運転結果

#### (1) Case 1 : ピーク波周期4s

海の波はおおむね、5~15sとされ、浮体の固有周期より長いため、自然な状態で共振が起きることは少ないが、時により、短周期の波が来て、浮体を大きく揺らすことがある。Case 1 (図4.16) は、そのようなまれな事例である。

浮体固有周期約4sと良く一致する入射波の三つの山が来た時に、浮体が鋭く反応し、最大出力6kW(発電機No.1)近くまで発電したことがわかる。発電は浮体の上昇と下降の両方で行われ、波の山と谷では停止してゼロになるので、3つの波で6つ程度の発電ピークが表れている。なおこの発電量は、発電機のトルクと回転数を乗じて得たものであり、実際の発電量はこれから発電機の損失分が差し引かれる。

使用した発電機は、図4.2に示したように、定格トルク50Nm(上下推力約20KN相当)、定格回転数2000RPM(上下速度約1m/s相当)を、2台使用している。

中央の10秒間に注目する。発電機2台分の積算発電量=40kWsより、平均発電パワーは、 $P_{out}=40kWs/10s=4kW$ となる。図4.16の下の図は、同じ時刻の発電機のトルクと回転数の時系列を定格に対するパーセントで表示したものである。トルク、回転数とも、ほぼ中央で最大値をとり、いずれもほぼ75%であることがわかる。

定格吸収パワー(10kW) = 定格推力(10kN) × 定格速度(1m/s)  
であるから、75%で運転されている時には

吸収パワー  $P_{abs}$  (5.6kW) = 定格推力(7.5kN) × 定格速度(0.75m/s)  
となり、ピークで、ほぼ6kWの発電ができていることが分かる。

図4.20は、入射波のパワースペクトルであり、三つほどのピークの右端のピークが、固有周期4sに相当していることがわかる。この図からは、入射波パワーの算定が難しいため、近似的に、 $T=4.2s$ 、 $H=0.5m$ の正弦波と考えると、単位幅あたり入射波パワーは、 $P_w \doteq H^2 \times T$ 、さらに、波入射方向はほぼ東であったので、幅2.5mとすると、捕捉幅比は、

$$CWR = \frac{P_{abs}}{P_w \cdot B} = \frac{4}{2.6} = 1.54 \dots\dots\dots(4.1)$$



の高効率となり、ポイント・アブソーバ効果が現れているように見える。

### (2) Case 2 : ピーク波周期9s

Case 2は、ピーク波周期9sの場合の30sのデータである。

図4.17の上の図から、1台あたりの発電パワーが最大で、約16kW(定格の160%)に達していること、および平均発電パワー $P_{abs}$ は、2台合計で10kWであることがわかる。

図4.21は、この時間帯の入射波のパワースペクトルであり、その面積から、求めた単位幅あたりの入射波パワー $P_w$ は、3.2kW/mであった。

従って、捕捉幅比は、

$$CWR = \frac{P_{abs}}{P_w \cdot B} = \frac{10}{3.2 * 2.5} = 1.27 \dots\dots\dots(4.2)$$

図4.17の上の図で発電パワー (Power kW) カーブが、負の値を取っているのは、最適速度制御によるリアクティブ制御が行われたためである。力行運転でパワーを消費しているが、波に対して浮体の位置移動が $\pi/2$ だけ遅れ、共振現象が起きていることがわかる。

図4.17の下図は、発電機のトルクと回転数が示されている。速度が最大で、定格の90%程度であるのに対して、トルクの最大値は、定格の160%で、頭打ちになっている。これは、発電機の保護のため、定格トルクの $\pm 160\%$ を限度として、それ以上のトルクが出ないように設定したからである。

Case 1に比べて、トルクが不足しており、もっとトルクに余裕があれば、さらに大きな発電パワーが得られたであろうことがわかる。

### (3) Case 3 : ピーク波周期11s

Case 3は、ピーク波周期11sの場合の30sのデータである。

図4.18の上の図から、1台あたりの発電パワーが最大で、約15kWに達していること、および平均発電パワー $P_{abs}$ は、2台合計で4.7kWであることがわかる。

図4.22は、この時間帯の入射波のパワースペクトルであり、その面積から、求めた単位幅あたりの入射波パワー $P_w$ は、2.2kW/mであった。

従って、捕捉幅比は、



$$CWR = \frac{P_{abs}}{P_w \cdot B} = \frac{4.7}{2.2 \cdot 2.5} = 0.85 \dots\dots\dots(4.3)$$

Case 3は、Case 2と比べて、ピーク周期が9sから11sと、20%増えたに過ぎないが、その影響は大きく、トルク不足が一層目立ってくる。折角のトルクの多くの部分がリアクティブ制御に費やされて、発電に使用される分が圧迫されてしまっている。

ほぼ同様の図4.18の上の図で発電パワー（Power kW）カーブが、負の値を取っているのは、最適速度制御によるリアクティブ制御が行われたためである。力行運転でパワーを消費しているが、波に対して浮体の位置移動が $\pi/2$ だけ遅れ、共振現象が起きていることがわかる。

図4.18の下図は、発電機のトルクと回転数が示されている。トルクの最大値が、定格の160%で、頭打ちになっている一方で、速度は、定格の70%程度で余裕がある。

もっとトルクに余裕があれば、さらに大きな発電パワーが得られたであろうことがわかる。

#### (4) Case 4 : ピーク波周期13s

Case 4は、さらに長周期の場合、ピーク波周期13sの場合のデータである。

図4.19の上の図から、1台あたりの発電パワーが最大で、約6kWに達していること、および平均発電パワー $P_{abs}$ は、2台合計で1.25kWであることがわかる。

図4.23は、この時間帯の入射波のパワースペクトルであり、その面積から、求めた単位幅あたりの入射波パワー $P_w$ は、2.2kW/mであった。

従って、捕捉幅比は、

$$CWR = \frac{P_{abs}}{P_w \cdot B} = \frac{1.25}{2.2 \cdot 2.5} = 0.23 \dots\dots\dots(4.4)$$

Case 4は、Case 2と比べて、ピーク周期が13s 増えた結果、トルク不足が一層目立ってくる。折角のトルクの多くの部分がリアクティブ制御に費やされて、発電に使用される分が圧迫されてしまっている。

図4.19の下図は、発電機のトルクと回転数が示されている。トルクの最大値が、定格の160%で、速度は、定格の40%程度しか使用されていない。

トルクと回転数のバランスが、もっと良ければ、さらに大きな発電パワーが得られたであろうことがわかる。

#### 4.3.4 まとめ

4つのケースを見ればわかるように、最適速度制御は、広い周期範囲において、発電機の能力の範囲内で、リアクティブ制御を実現できている。

Case 2 からCase 4 までの捕捉幅比をまとめると、表4.1のようになり、ピーク周期に対してプロットすると、図4.24のようになる。(入射波パワーが明確でない、Case 1は除いた)

長周期側での捕捉幅比が小さいのは、トルク制限のためであり、大幅に改善できる。

もともとの計画値は、以下である。

- 発電機トルク            定格 50Nm×2 台
- 発電機回転数           定格 2000RPM
- 浮体最大推力            約 10kN×2 台
- 浮体最大速度            約 1m/s

回転運動を直線運動に変換する変速比を変えて、例えば

- 浮体最大推力            約 20kN×2 台
- 浮体最大速度            約 0.5m/s

という力を重視した設定であれば、Case 1のような短い周期では、速度不足を招くであろうが、それ以外の場合には、トルク不足が解消し、より大きな発電パワーが得られたであろう。

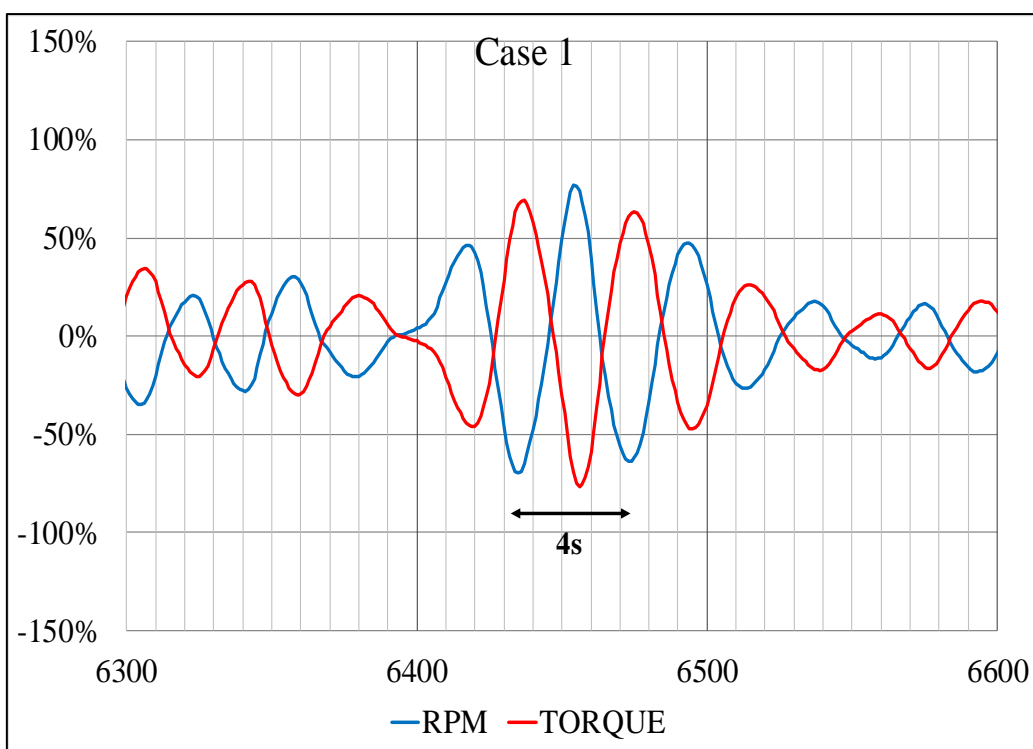
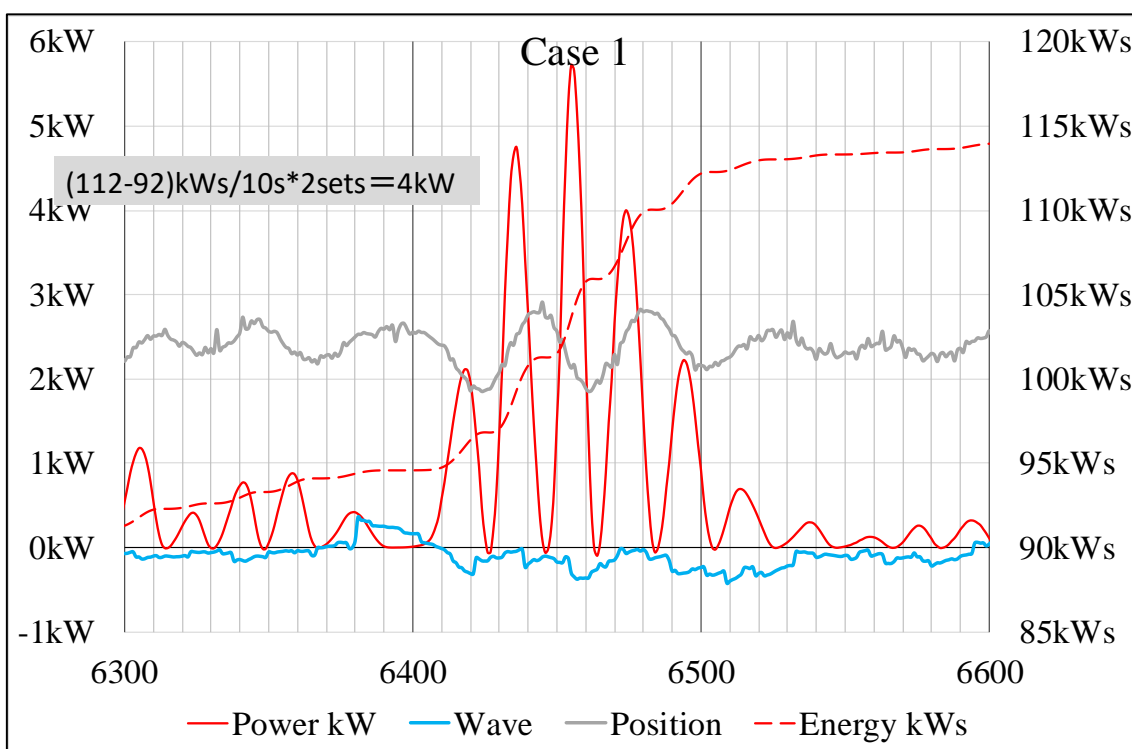


図4.16 (Case 1) 運転データ :  $T_p=4s$

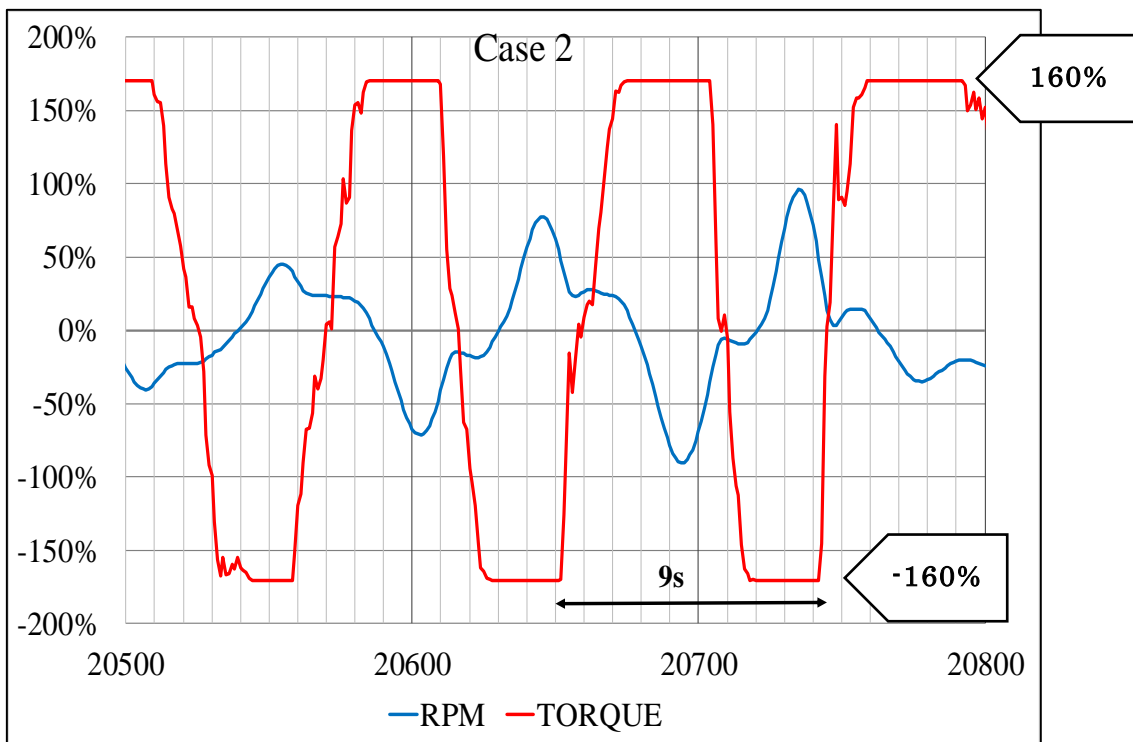
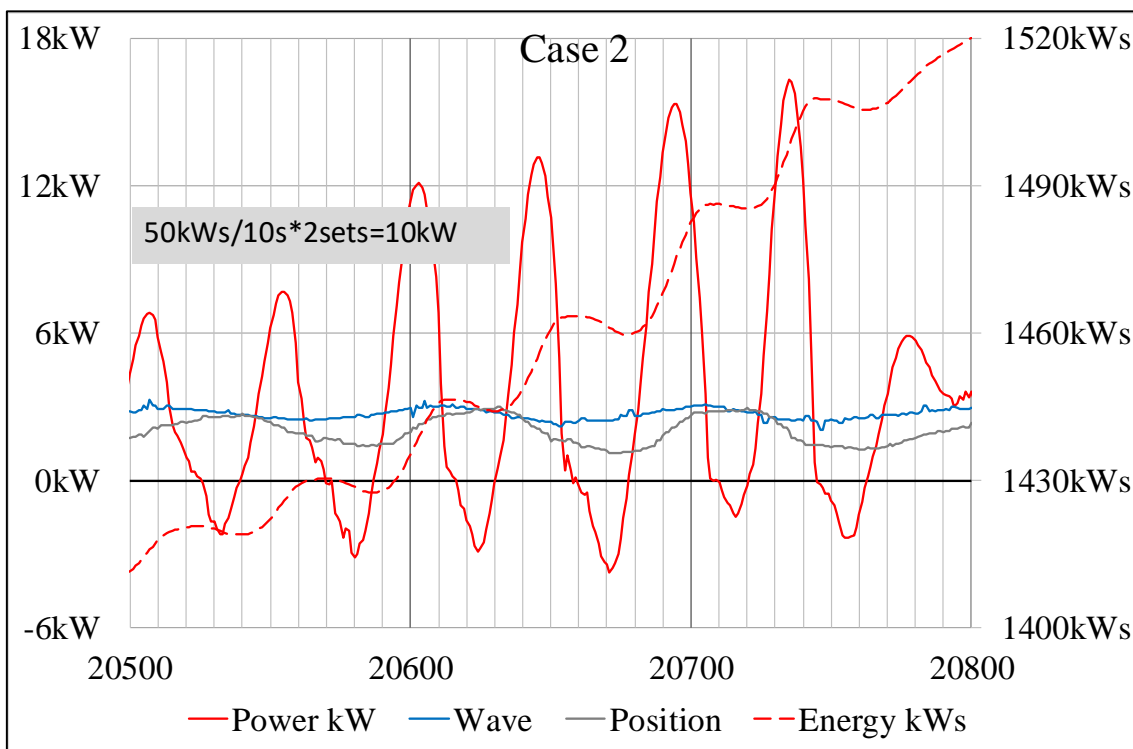


図4.17 (Case 2) 運転データ :  $T_p=9s$

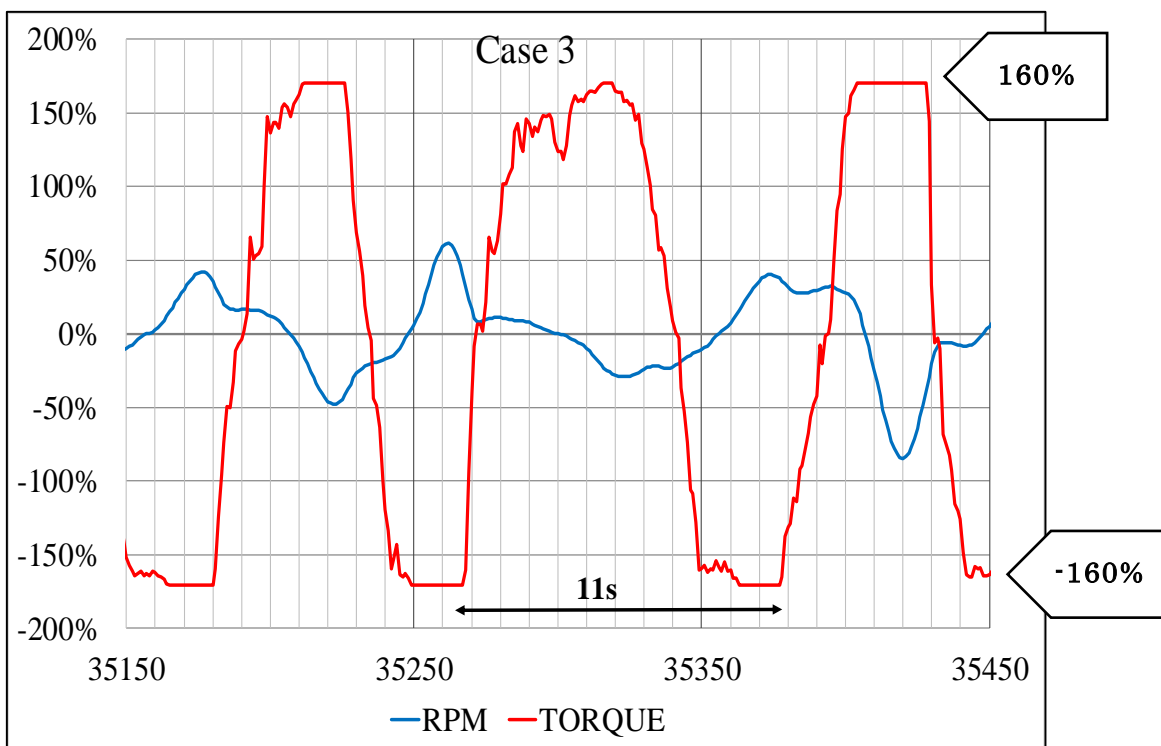
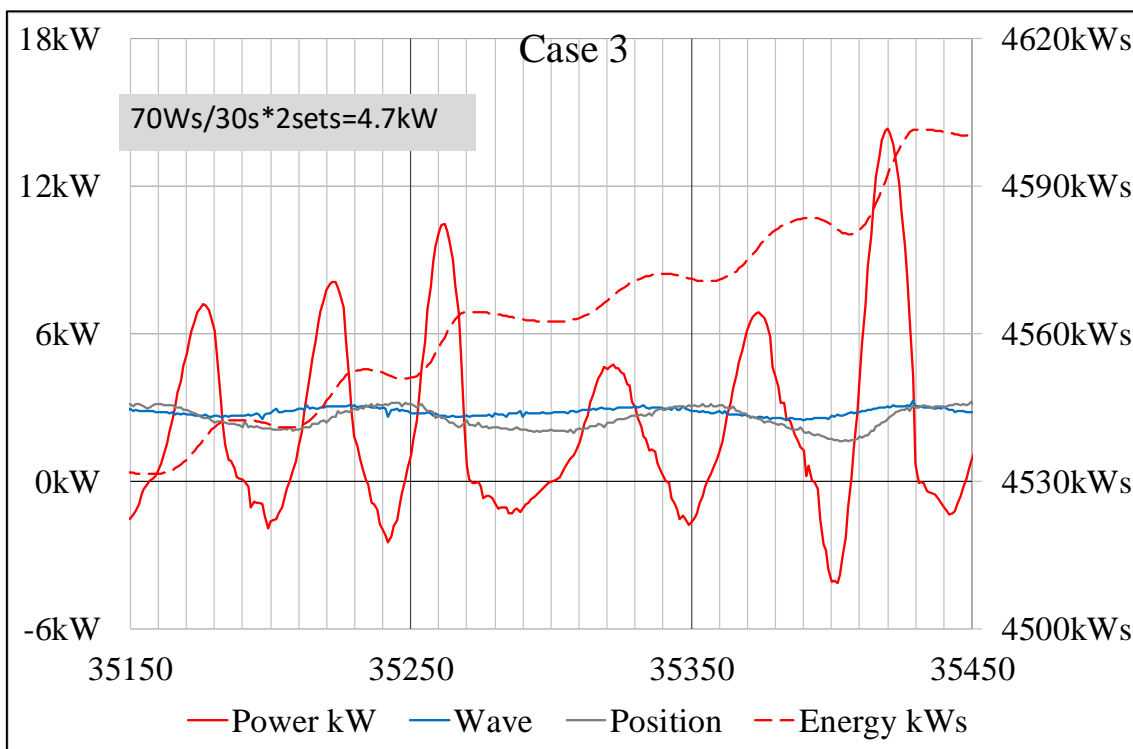


図4.18 (Case 3) 運転データ :  $T_p=11s$

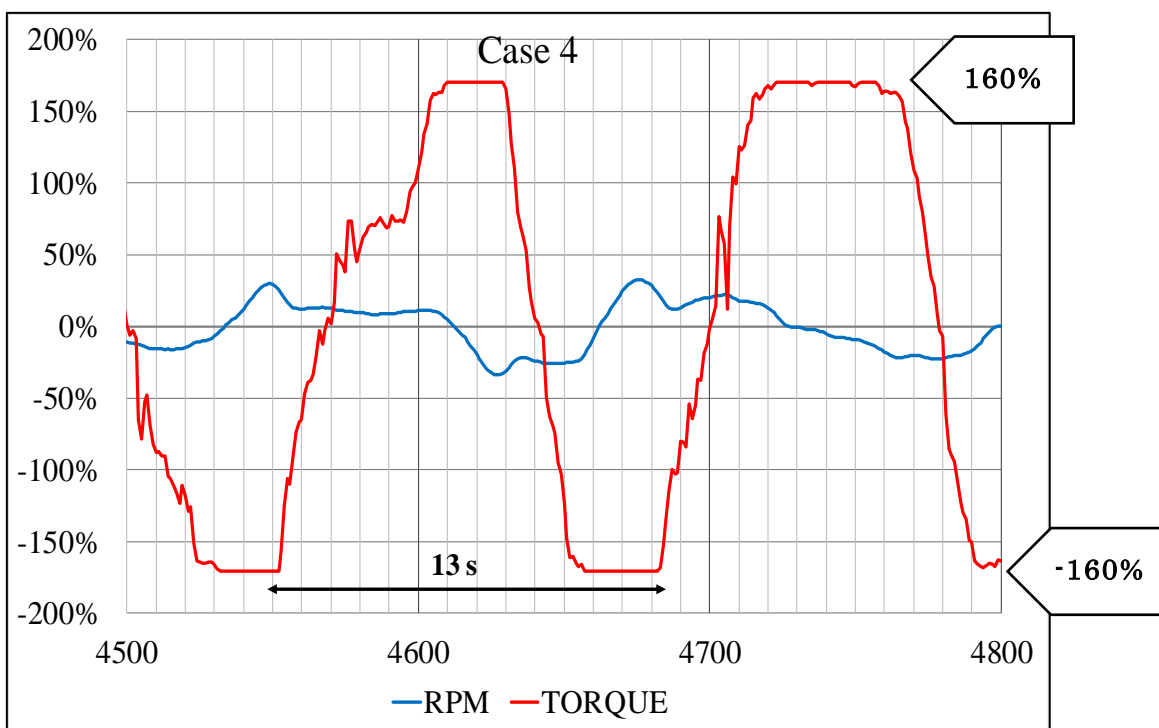
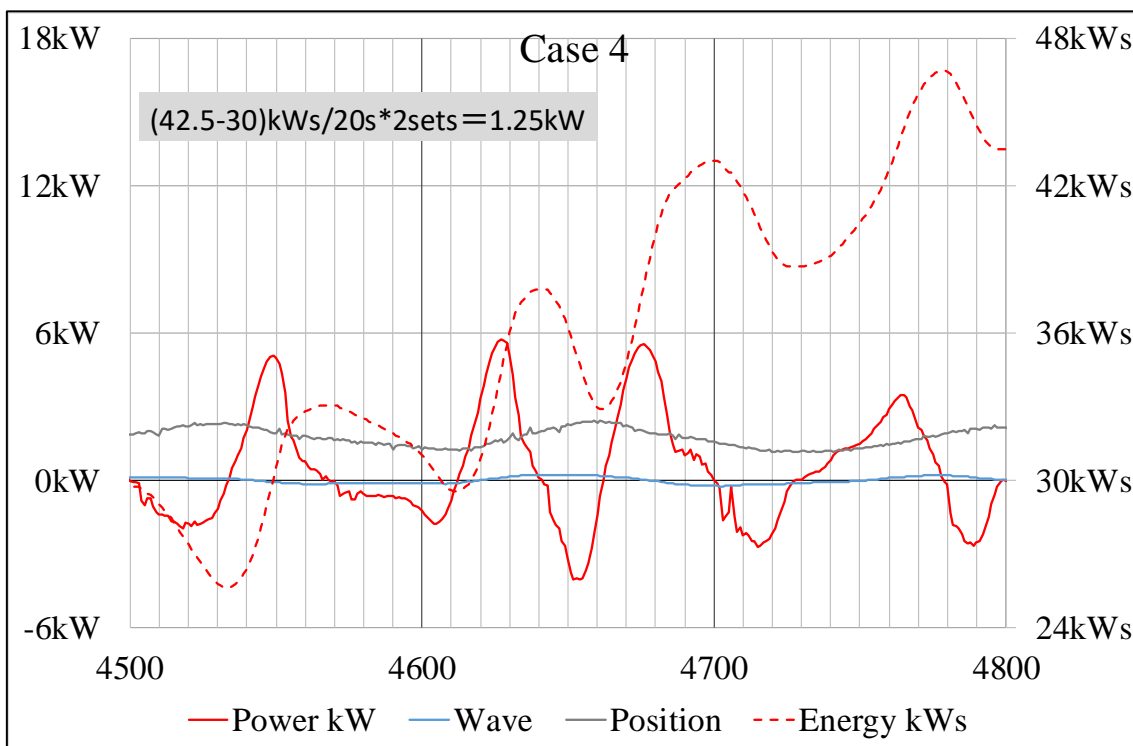


図4.19 (Case 4) 運転データ :  $T_p=13\text{s}$

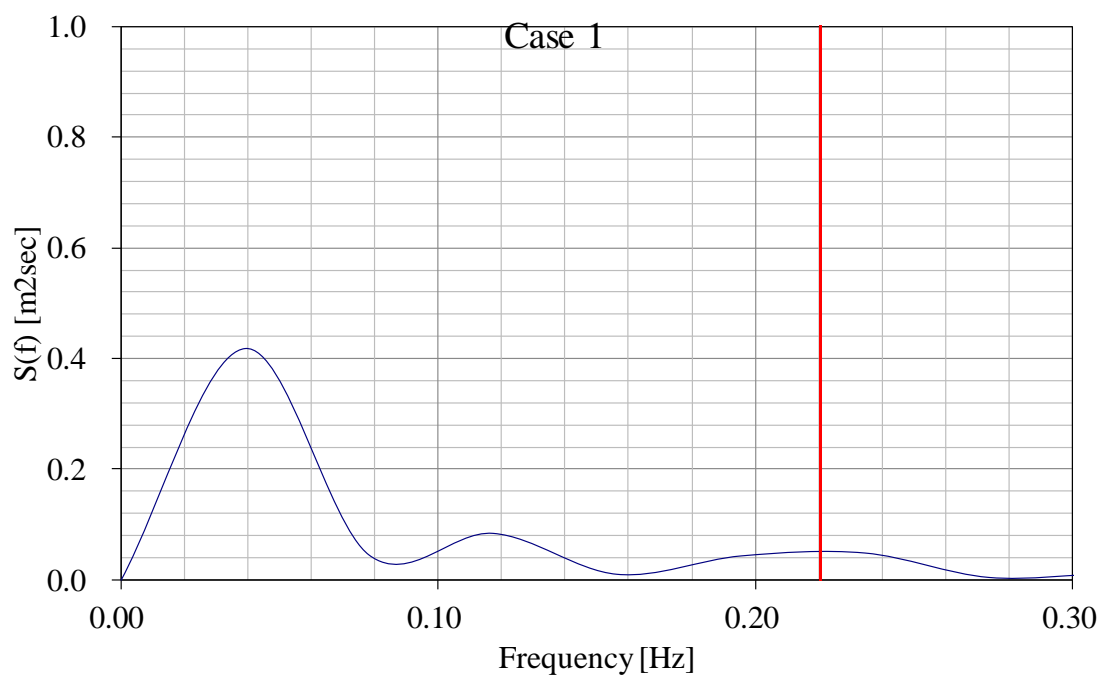


図4.20 (Case 1) 入射波スペクトル

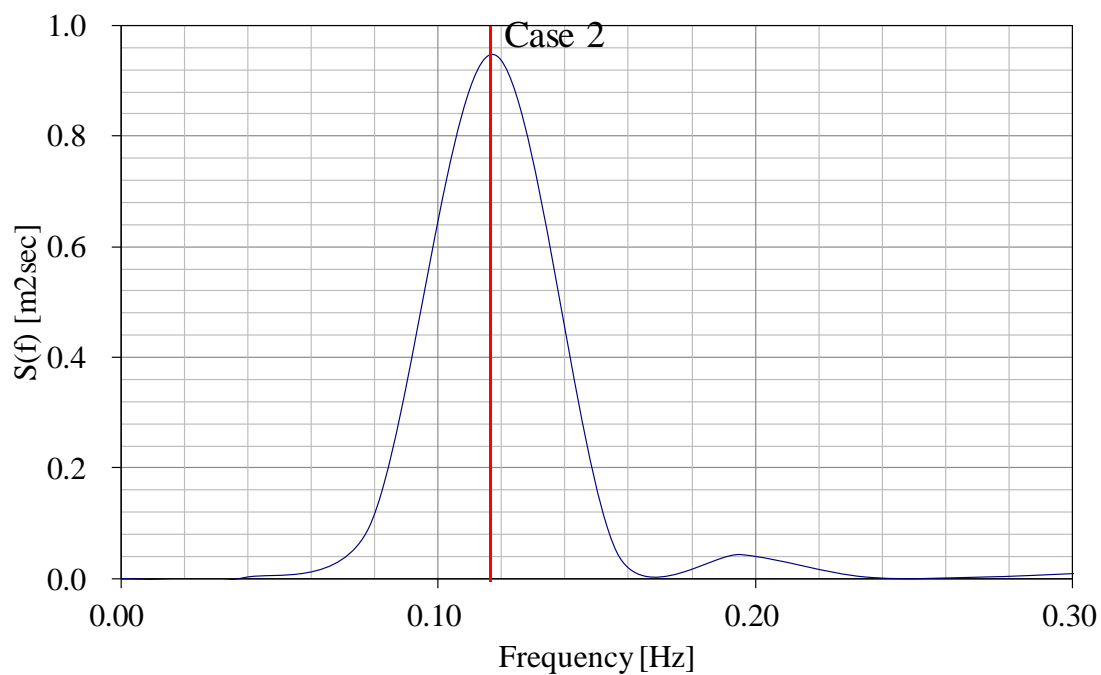


図4.21 (Case 2) 入射波スペクトル:  $P_w = 3.2$  kW

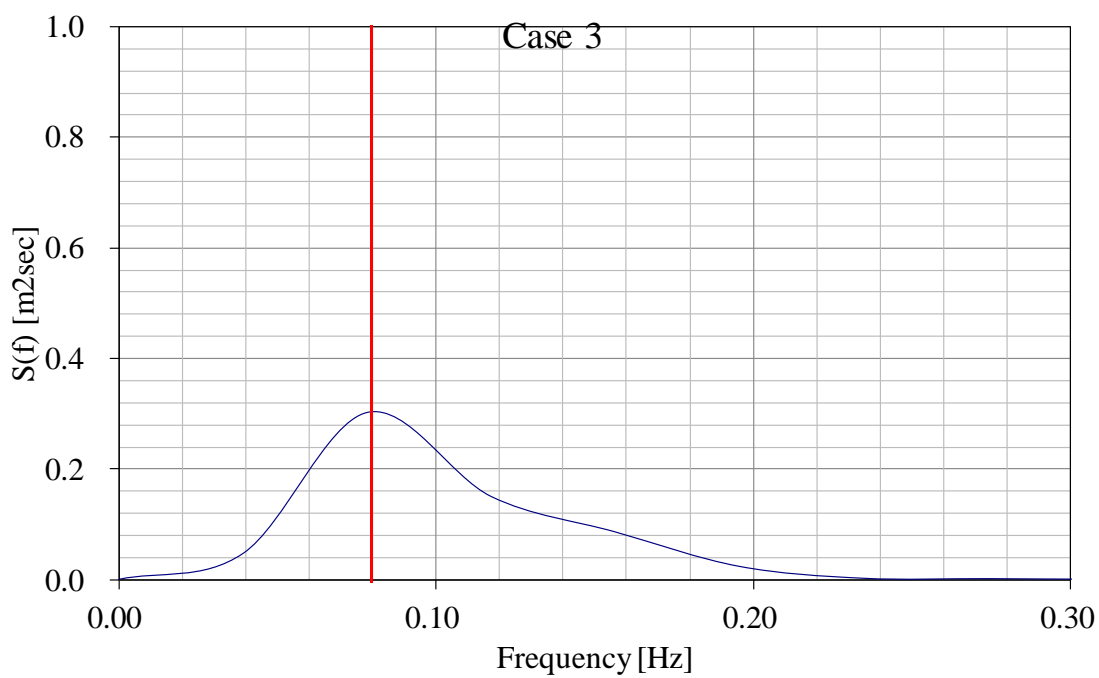


図4.22 (Case 3) 入射波スペクトル:  $P_w = 2.2 \text{ kW}$

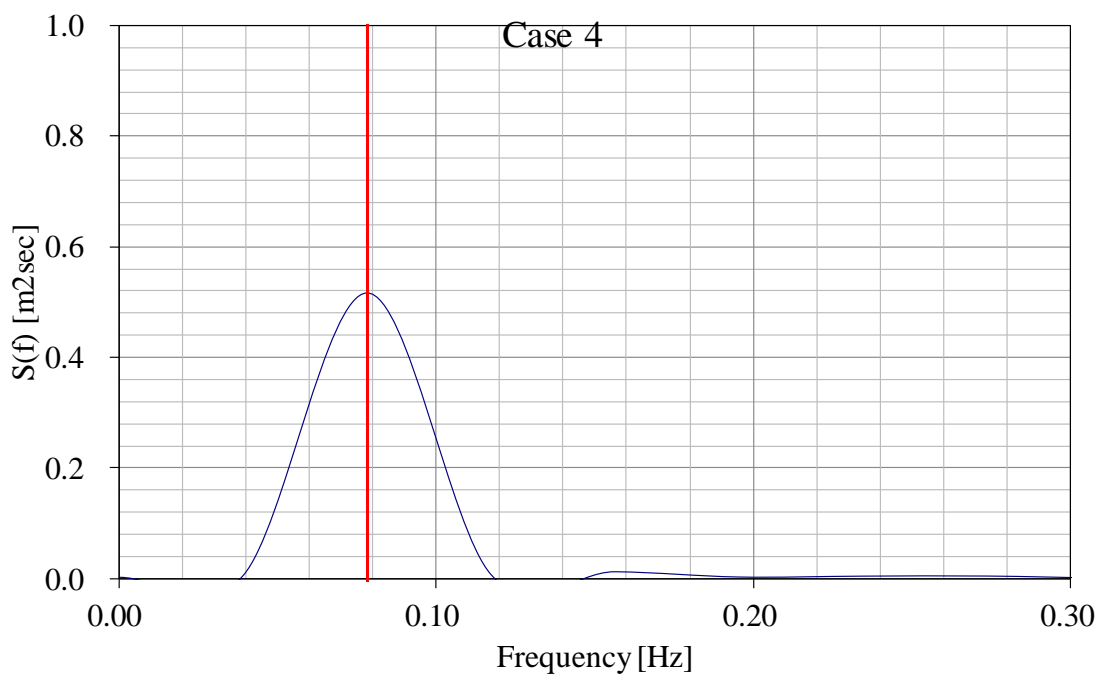


図4.23 (Case 4) 入射波スペクトル:  $P_w = 2.2 \text{ kW}$



表4.1 捕捉幅比

	吸収パワー	幅あたり 入射波パワー	捕捉幅	捕捉幅比	ピーク 周期
<i>case</i>	<i>Pabs</i>	<i>Pw</i>	<i>C</i>	<i>CWR</i>	<i>Tp</i>
2	10 kW	3.2 kW/m	3.17 m	1.27	9.0 s
3	4.7 kW	2.2 kW/m	2.14 m	0.85	11.0 s
4	1.3 kW	2.2 kW/m	0.58 m	0.23	13.0 s

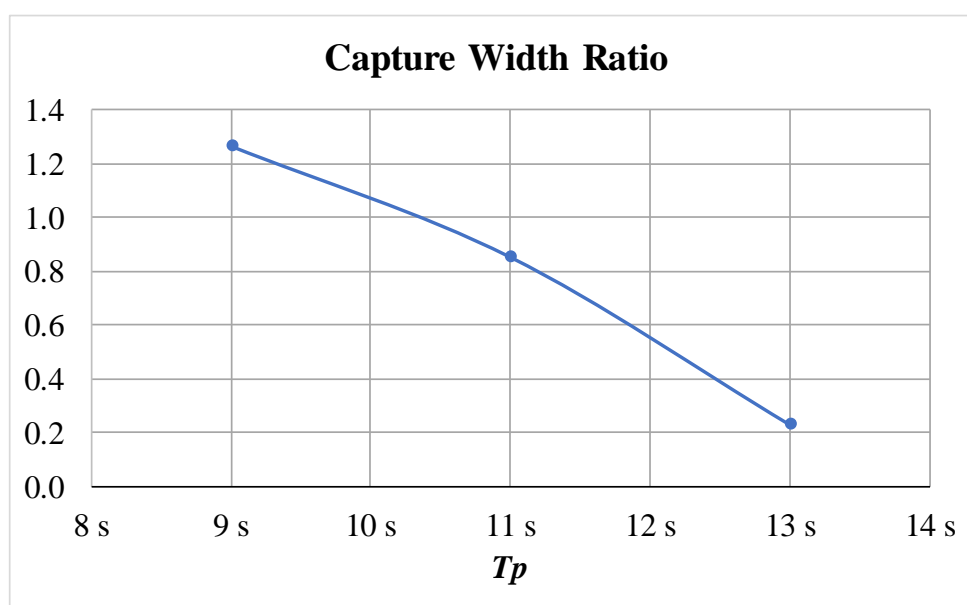


図4.24 捕捉幅比

## 第 5 章 結論

本実証試験で得られた成果と課題は以下の通りである。

- いくつかの世界初の試みにおいて成功を収めた。ひとつは、Falnes が理論解を示したリアクティブ制御を実海域の実証試験で実現したことである。波周期 4s~13s の広い周期範囲で、電氣的共振を起こすことに成功し、大きな発電が得られた。装置の幅は、2.5m であるが、自分の幅以上の大きな波パワーを得る例もあった。
- この方法として、著者が、造波装置の制御方法として、三十数年前に理論づけた、吸収（無反射）造波制御が、波エネルギー変換にも使用できることが証明された。
- この方法は、波形センサー信号を速度指令にフィードバックすることで、浮体の位相が、入射波に対して  $\pi/2$  遅れるため、共振条件が容易に実現でき、制御係数は、事前に計算可能であるため、装置設置後、すぐに使用可能である。さらに、学習機能を付加することにより、卓越周波数にあわせて最適値を取得することも可能である。
- この吸収造波制御の吸収の概念と、Falnes の考える共振の概念とは、同一の事象を指すことが証明できた。吸収は、速度ポテンシャル理論から導き出される概念であるが、共振は、強制振動理論から導き出される概念である。
- 上下浮体の場合、構造的に、背面にも波を造らざるを得ない。つまり入射波の半分を吸収し、50%波高を反射し、50%波高を透過するように制御するしかない。しかし、図 4.24 の捕捉幅比を見ると、浮体の幅以上のパワーを吸収できているところがある。ポイント・アブソーバ効果により、自分の幅以上のパワーが集まるためである。風力発電では、自分の受風面積の約 60%が上限になる（ベッツの法則）ので、これは、波力発電特有のメリットと言える。
- 本来、軸対称浮体が使用されるべきポイント・アブソーバに、箱型浮体を使うという試みに成功した。直径が 2m を超える鋼管は、鋼板を大型プレスで曲げた後に溶接するが、これを製作できる工場は少ない。これに対し、箱型形状は鋼板の溶接のみで製作できるため製造が容易である。これがコストに与えるインパクトは多大である。
- 沿岸型波力装置は、水深が浅い沿岸域に設置する着底式の波力発電装置であ

る。沿岸域で波がやや小さいなどの不利な点もあるが、装置の設置や海底ケーブルの施工は、比較的容易になる。メンテナンスについても同様で、かつインフラ等が整備された港湾等に設置することで多くのメリットが存在する。

- 浮体が沈降する仕組みにより、3m を超えるような大きな波から受ける外力を減らすことに成功した。ただし防波堤外の厳しい外洋に設置することで、コストを含めた各種の課題がある、これらを克服して、実用化に繋げていくつもりである。

## 謝辞

本研究は、環境省委託事業である CO<sub>2</sub>排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業再生可能エネルギー・自立分散型エネルギー低炭素化技術開発分野のうち、「小型で高効率な波力発電システムに関わる技術開発・実証事業（副題：大洗港における実証）」による成果の一部であります。環境省地球環境局，国土交通省港湾局をはじめとする国等のご支援を頂き。さらに，茨城県及び大洗町並びに大洗町漁業組合に多大なご協力を頂いております。ここに深く謝意を表すものです。

本論文をまとめるに当たり，細部にわたってご指導を賜りました中央大学理工学部 有川 太郎教授に，深く感謝申し上げます。さらにまた不案内な大学のことでも，様々なご助力をいただいた研究室のみなさまにも，深く感謝申し上げます。

会社関係では，私の研究生生活に深いご理解を承りました三井造船鉄構エンジニアリング株式会社（現 株式会社三井 E & S 鉄構エンジニアリング）中野課長様，堀口様，その他のプロジェクトメンバーの方々に心より感謝いたします。

私が，造波装置から波力発電に携わるきっかけとなったのは，三十数年前に，当時 三井造船昭島研究所 社長 山内保文博士のご紹介によって，吸収式造波機の発明者であるエジンバラ大学 Stephan Salter 教授に面談の機会を得たことによります。この出会いが無ければ，この道を歩くことはなかったと思います。お二人には心から感謝申し上げます。

さらに今回，研究をまとめるにあたって Salter 教授に連絡をとったところ，ご高齢にもかかわらず暖かい励ましのメールをいただきました。

もともと波の世界とは無縁だった私がここまで来れたのは，私の周囲の多くの方々からご支援と勇気とをいただいたからです。ありがとうございます。

## 参考文献

- Babartit, A and Hals, J (2011). “On the maximum and actual capture width ratio of wave energy converters,” 11th European Wave and Tidal Energy Conference Series (EWTEC 2011)
- Budal K and Falnes J (1975). “A resonant wave point absorber of ocean waves,” *Nature* 256, 478-479
- Evans D (1976). “A theory for wave-power absorption by oscillating bodies,” *J Fluid Mech*, 77, 1-25
- Falcao, A, (2010). “Wave energy utilization: A review of the technologies”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol 14, No 3, pp 899–918.
- Falnes, J (2007). “A review of wave-energy extraction,” *Marine Structures* 20(4), 185-201
- Falnes, J (2002). *Ocean Waves and Oscillating Systems, Linear Interactions Including Wave-Energy Extraction*, Cambridge University Press, 196
- Falnes, J (1995). *Principles for Capture of Energy from Ocean Waves. Phase Control and Optimum Oscillation*, Technical Report, Department of Physics, NTNU, N-7034 Trondheim, Norway
- Hirakuchi, H, Kajima, R and Kawaguchi, T (1990). “Application of a piston-type absorbing wavemaker to irregular wave experiments,” *Coastal Engineering in Japan*, 33(1), 11-24.
- Kawaguchi, T (1986). “Absorbing wave making system with wave sensor and velocity control,” Tech. Report No. 128, Mitsui Engineering & Shipbuilding CO., LTD. (in Japanese), 20-24
- Kawaguchi, T (2018). “Wave Energy Converter with Wave Sensor and Velocity Control,” *Proceedings of the Twenty-eighth (2018) International Ocean and Polar Engineering Conference*, 678-684
- Masuda Y (1986). “An experience of wave power generator through tests and improvements,” *Hydrodynamics of Ocean Wave Energy Utilization*, 445-452
- Miyajima, S, Nakano, K and Kawaguchi, T, (2015). “Development of the bottom-

- mounted wave energy converter (WEC) on the coast” The 25th Ocean Engineering Symposium, 257-264
- Miyajima, S, Nakano, K, Maemura, T, and Kawaguchi, T (2016). “Development of the coastal wave power generation device,” 2016 Techno-Ocean
- Newman JN (1976). “The interaction of stationary vessels with regular waves,” Proceedings of the Eleventh Symposium on Naval Hydrodynamics, 491-501
- Salter, SH (1982). “Absorbing wave-makers and wide tanks,” Proc. Conf. Directional Wave Spectra Applications, ASCE, 185-202
- Salter, SH (1974). “Wave power,” Nature, 249, 720
- 川口隆 (1986): 波面検出及び速度制御を用いた無反射制御方式, 三井造船技報・第 128 号
- 小林正典, 日根野元裕 (1974): 非対称断面をもつ柱状体に働く流体力, 三井造船技報・第 87 号
- 谷澤克治他 (2002): 実海域試験水槽, 海上技術安全研究所報告 第 17 巻第 3 号
- 平口博丸, 鹿島遼一, 川口隆 (1988): 水面波形制御方式による無反射造波機の不規則波実験への適用性, 第 35 回海洋工学講演会論文集
- 益田善雄 (1987): 日本の波力発電一波に憑かれて四十余年, 霞出版社 (1987)
- 元良誠三監修, 小山健夫, 藤野正隆, 前田久明著 (1992): 改訂版 船体と海洋構造物の運動学, 成山堂

付録 1 波面検出及び遠度制御を用いた  
無反射造波方式（1986年発表）



## 波面検出及び速度制御を用いた無反射造波方式

**Absorbing Wave Making System with Wave Sensor and Velocity Control****Takashi Kawaguchi**

In order to reproduce waves in test tanks by mechanical displacement of water, wavemakers for hydraulic model testing employ DC servomotors or electrohydraulic servocylinders to oscillate waveboards. In such a case, most conventional wavemakers, controlled by signals which fix their waveboard displacement behave as rigid reflectors and cause re-reflection of waves from waveboard, when there are reflections from models, beaches, or tank walls.

Therefore, attempts have been made to develop absorbing wavemakers for avoiding the re-reflections, recently. In this paper, an absorbing wave making system to control the waveboards according to the measured wave actions in front of waveboards are theorized, based on linear wave theory, and the mathematical model of the wavemaker-tank system is built. Furthermore, for predicting the performance, computer simulations are carried out, the results of which show excellent features of the system.

水理模型実験で使用する造波機は、水中の造波板部を動揺させて波を起こすが、その際、直流電動機や油圧サーボを使って、造波板位置を精密に制御する方法が、採用されてきている。しかし、模型や水槽壁などの反射がある場合には、反射されて戻ってくる波が、造波面で再反射し、本来造波されるべき波の上に付加されるため、制御精度をいくら向上させても、必要な波を安定して起こすことができないという欠点がある。本報文では、波高計や波圧計で検出した造波板前面の水面情報により造波板速度を制御する方法を理論づけ、更に数学的モデルによるシミュレーションから、この造波方法が再反射の少ない極めて良い特性を持っていることを確認した。

**1. まえがき**

水理模型実験に用いられる造波機は、不規則波実験が一般化するのに従い、直流電動機や油圧サーボを用いて造波板の正確な位置制御—電氣的に与

えられる指令入力信号に造波板変位を一致させるような制御—を行い、その結果として、波を起こすという方法が、とられている

しかし、造波された波が、模型や水槽壁などで反射し造波板側に戻って来るような場合には、造波板の正確な位置制御を行うことが、そのまま正確な造波を行うことにはならない。つまり、反射して戻った波が、再び造波板面で反射し、本来造波されるべき波に加わるため、実験に必要な波を連続的に安定して造波することができなくなるという問題を持っている。

この問題を解決するため、造波板前面の状態変化を、力や波高などで、直接的・間接的にとらえ、それをもとに造波板を制御して、造波板での反射を減じつつ造波を行おうとする試みが近年いくつかなされている。

本報文は、波高計や圧力計により直接に検出された造波板前面の水面情報によって、造波板の速度を制御する方法をとりあげ、その理論づけと、数学的モデルによる性能検討の結果とをとりまとめたものである。

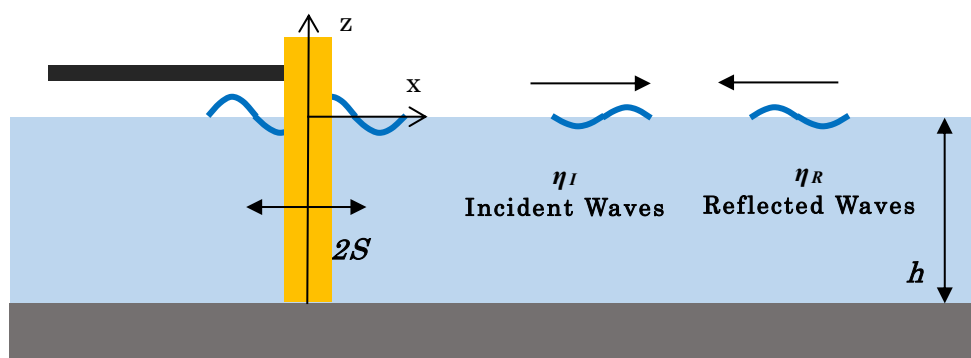


Fig.1 水槽中の波

## 2. 理論式

### 2.1. 重複波中の流速と水面変動

水路における座標系を、Fig. 1 のように、静水面上、水路方向に  $x$  軸を、鉛直方向に  $z$  軸をとり、 $x=0$  の位置にピストン型の造波板を置くものとする。

この水路中に、造波板で造波されて  $x$  の正方向に進む波  $\eta_I$  とそれが、模型や水槽壁などで反射して  $x$  の負方向に進む波  $\eta_R$  とが、存在するとき、それぞれの波面変動は次のように表現できる。

$$\begin{aligned}\eta_I &= a_I \cos(\omega t + k_0 x + \varepsilon) \\ \eta_R &= a_R \cos(\omega t - k_0 x + \varepsilon)\end{aligned}\quad (1)$$

ここに、 $a_I$ 、 $a_R$ はそれぞれの波振幅、 $\varepsilon_I$ 、 $\varepsilon_R$ は位相、また  $K$ は波数( $=2\pi/L$ : $L$ は波長)、 $\omega$ は角周波数( $=2\pi/T$ : $T$ は波周期)を示す。

次に、造波板の運動によって、この  $\eta_R$ を消波し、同時に  $\eta_I$ を造波することを考え、造波板の変位  $X$ を、 $\eta_I$ を造波するための変位  $X_I$ と、 $\eta_R$ を消波するための変位  $X_R$ とに分けて取り扱うこととする。変位  $X_I$ 及び  $X_R$ のおおのの振幅を  $e_I$ と  $e_R$ とおくと、変位  $X$ 及び速度  $\dot{X}$ は、 $\eta_I$ 、 $\eta_R$ との位相関係から、それぞれ

$$\begin{aligned}X &= X_I + X_R = S_I \sin(\omega t + \varepsilon_I) - S_R \sin(\omega t + \varepsilon_R) \\ \dot{X} &= \dot{X}_I + \dot{X}_R = S_I \omega \cos(\omega t + \varepsilon_I) - S_R \omega \cos(\omega t + \varepsilon_R)\end{aligned}\quad (2)$$

で表現される。

このとき、微小振幅波理論から、 $x > 0$ での水路における速度ポテンシャルは、変位  $X_I$ で  $x$ の正方向への進行波を造波し、変位  $X_R$ で  $x$ 負方向への進行波を消波するという条件を与えることにより、

$$\begin{aligned}\phi &= \bar{A} S_R \frac{g \cosh k(z+h)}{\omega \cosh kh} \sin(\omega t - kx + \varepsilon) + \bar{A} S_I \frac{g \cosh k(z+h)}{\omega \cosh kh} \sin(\omega t + kx + \varepsilon) \\ &\quad - \cos(\omega t + \varepsilon) \sum_{n=1}^{\infty} \bar{C}_n S_R \frac{g \cos k(z+h)}{\omega \cos kh} e^{-k_n x} + \cos(\omega t + \varepsilon_i) \sum_{n=1}^{\infty} \bar{C}_n S_I \frac{g \cos k(z+h)}{\omega \cos kh} e^{-k_n x}\end{aligned}\quad (3)$$

ただし、 $g$ は重力加速度を、また  $\bar{A}$ 他の値については、

$$\begin{aligned}\bar{A} &= \frac{2 \sinh^2 kh}{kh + \sinh kh \cosh kh} \\ \bar{C}_n &= \frac{2 \sin^2 k_n h}{k_n h + \sin k_n h \cos k_n h}\end{aligned}\quad (4)$$

$$\frac{\omega^2}{g} = k \tanh kh = -k_n \tan k_n h \quad (5)$$

で表現される。

式(3)の右辺第1項は、 $x$ の正方向に進行する波（造波されるべき波）を、第2

項は、負方向に進行する波（消波されるべき波）を表し、第3項と第4項とは、造波板前面（ $x=0$ ）で振幅が最大で波長が無限に長い一種の定常波を表すことになる。

この第1項が  $\eta_I$  に、第2項が  $\eta_R$  に一致するためには、

$$\bar{A} = \frac{a_I}{e_I} = \frac{a_R}{e_R} \quad (6)$$

でなければならない。

ここで造波板前面（ $x=0$ ）における波面変動  $\eta_0$  を考えると

$$\begin{aligned} \eta_0 &= \frac{1}{g} \left( \frac{\partial \varphi}{\partial t} \right)_{\substack{x=0 \\ z=0}} \\ &= \bar{A} e_R \cos(\omega t + \varepsilon) + \bar{A} e_I \cos(\omega t + \varepsilon) + \sum_{n=1}^{\infty} \bar{C}_n e_R \sin(\omega t + \varepsilon) - e_I \sin(\omega t + \varepsilon) \end{aligned} \quad (7)$$

さらに

$$\bar{C} = \sum_{n=1}^{\infty} \bar{C}_n \quad (8)$$

とおき、式(2)、(6)を用いて、式(7)を整理すると、

$$\eta_0 = a_R \cos(\omega t + \varepsilon) + a_I \cos(\omega t + \varepsilon) + \bar{C} X \quad (9)$$

となる。

次に、式(2)の  $\dot{X}$  の式の両辺に  $\bar{A}/\omega$  を乗じ、式(6)で整理すると、

$$\frac{\bar{A}}{\omega} \dot{X} = a_R \cos(\omega t + \varepsilon) - a_I \cos(\omega t + \varepsilon) \quad (10)$$

となる。式(9)、(10)を用いての項を消去すると、

$$\frac{\bar{A}}{\omega} \dot{X} + \eta_0 = 2a_I \cos(\omega t + \varepsilon) \quad (11)$$

この右辺は、入射波の  $x=0$  における波形を示すので、これを、目標とする造波波形  $\eta_D$  とおいて、 $\dot{X}$  の式に変形すると、

$$\dot{X} = \frac{\omega}{A} 2\eta_D - \eta_0 + \bar{C}X \quad (12)$$

となる.

この式中の各項は、いずれも、既知であるか、直接的に検出あるいは制御が可能なるものであって、 $\eta_R$ のように直接検出できない量を含んでいない。つまり目標波形  $\eta_D$  が与えられたとき、波高計や波圧計で造波板前面の波面変動  $\eta_0$  を、また変位検出器で造波板変位  $X$  を検出し、式(12)を満足するような造波板速度  $\dot{X}$  になるよう造波板を制御するならば、この造波板は、 $x$  軸負方向への進行波  $\eta_R$  の大小にかかわらず、それを消波し、かつ正方向への進行波を定常的に造波することが可能になる。(Fig.2 参照)

以上から、 $\eta_0$  を検出して  $\dot{X}$  を制御する無反射造波方法（波面検出・位置制御型と呼ぶ）についての理論づけができたので、次節において、この方法の周波数応答モデルを検討する。

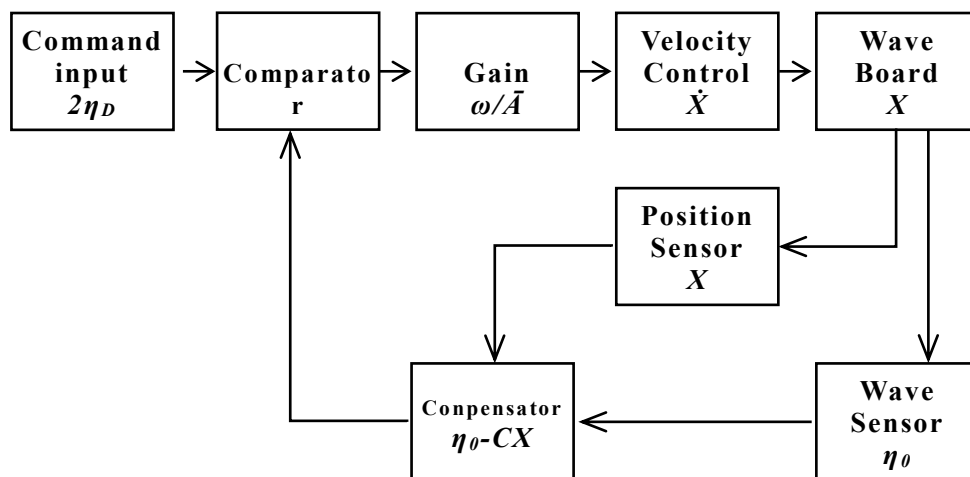


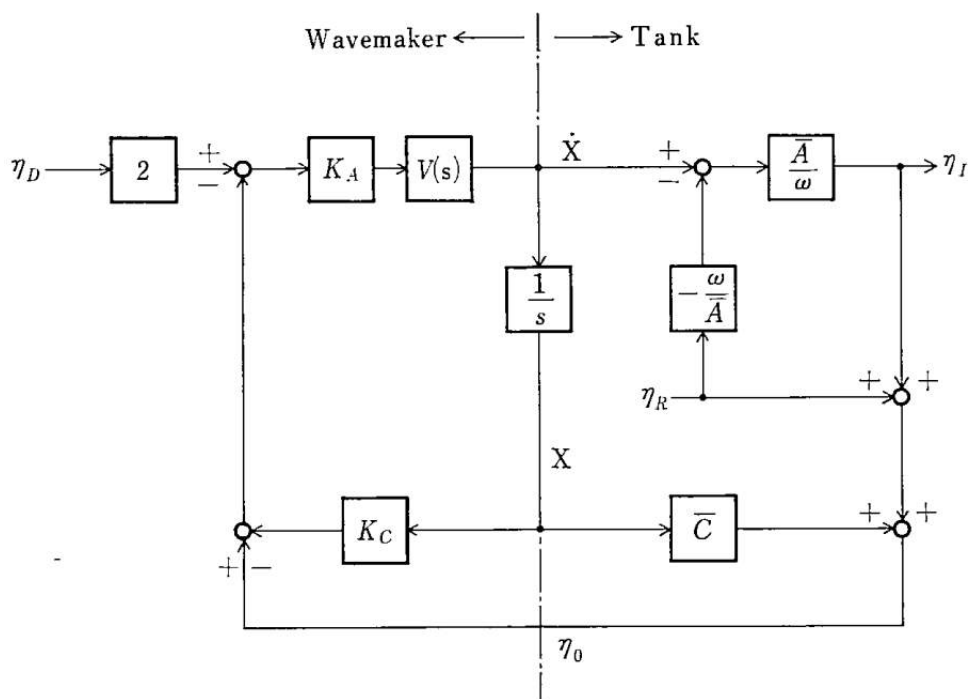
Fig.1 造波機の制御方法

### 3. 造波機—水槽系の周波数応答モデル

いままで、時間領域で考えてきた変数をラプラス変換し、 $S$  領域で取扱う。すなわち、 $\eta(t) \rightarrow \eta(s)$ ,  $X(t) \rightarrow X(s)$ ,  $\dot{X}(t) \rightarrow \dot{X}(s)$  のように置き換えると、ここで提案されている造波機—水槽系の造波板前面 ( $x=0$ ) における現象は、制御工学的には、Fig.3 のブロック線図で表現されることになる。なおこの図で、 $V(s)$

は速度制御系の伝達関数を示し、 $K_A$ 、 $K_C$ は、それぞれ  $\omega/\bar{A}$ 、 $C$ を電氣的に模擬した増幅器の伝達関数を示している。

この系は、二つの入力として、目標となる x 軸正方向への進行波  $\eta_D(s)$  及び消波さるべき負方向への進行波  $\eta_R(s)$ を、また一つの出力として実際に造波された 正方向への進行波  $\eta_I(s)$ を持つ系であり、それぞれの入力に対する系の伝達関数はそれぞれ次式のようになる。



**Fig.3 造波機-水槽系のブロック図**

$$G_D(s) \equiv \eta_I(s) / \eta_D(s) = \frac{2 \cdot V(s) \cdot K_A \cdot (\bar{A} / \omega)}{1 + V(s) \cdot K_A \cdot [(\bar{A} / \omega) + (\bar{C} - K_C) / s]} \quad (13)$$

$$G_R(s) \equiv \eta_I(s) / \eta_R(s) = \frac{1 - V(s) \cdot K_A \cdot [(\bar{A} / \omega) + (\bar{C} - K_C) / s]}{1 + V(s) \cdot K_A \cdot [(\bar{A} / \omega) + (\bar{C} - K_C) / s]} = 1 - G_D(s) \quad (14)$$

系の周波数応答関数は、伝達関数の  $S$  を  $j\omega$  で置き換えればよい。すなわち、 $\eta_D$  に対する  $\eta_I$  の応答は

$$G_D(s) \equiv \frac{2 \cdot V(j\omega) \cdot K_A \cdot (\bar{A}/\omega)}{1 + V(j\omega) \cdot (K_A/\omega) \cdot [\bar{A} - j(\bar{C} - K_C)]} \quad (15)$$

また、 $\eta_R$  に対する  $\eta_I$  の応答は、

$$G_R(s) = \frac{1 - V(j\omega) \cdot (K_A/\omega) \cdot [\bar{A} + j(\bar{C} - K_C)]}{1 + V(j\omega) \cdot (K_A/\omega) \cdot [\bar{A} + j(\bar{C} - K_C)]} = 1 - G_D(j\omega) \quad (16)$$

となり、それぞれの絶対値 $|G|$ と位相角 $\angle G$ を計算することにより、周波数応答のゲイン特性と、位相特性が求まることになる、

無反射という点で特に重要なのは、ゲイン特性 $|G_R|$ すなわち、造波機の反射率であって、この値がゼロに近づくほど、無反射性能が良くなることになる。(このとき、もう一つの応答 $|G_I|$ は、1に近づいて目標と実際が良く一致するようになる。)

この状態は、

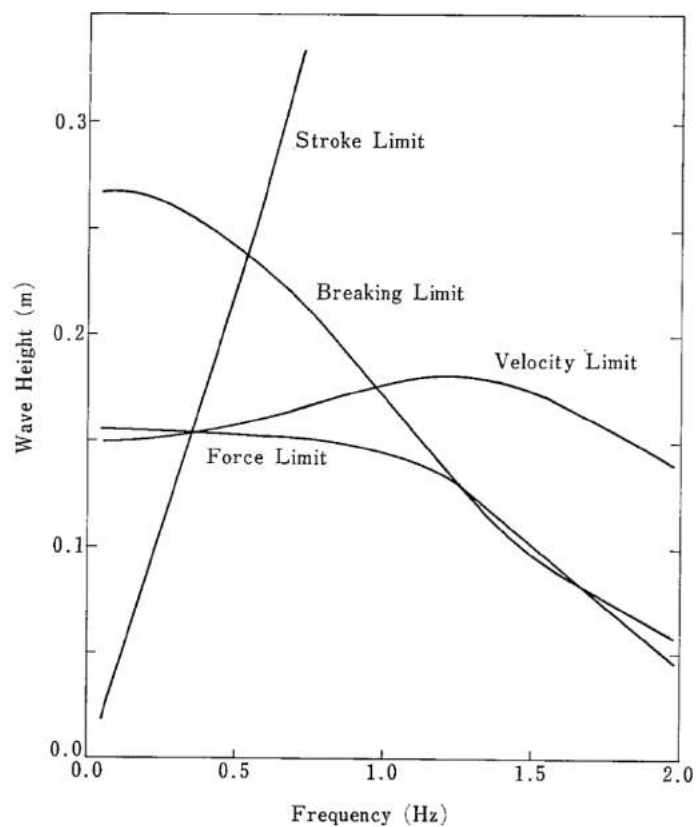
- (1) 速度制御装置、検出器が十分な性能を持ち ( $V(j\omega) \approx 1$ ),
- (2) 増幅器が  $\omega/\bar{A}$ ,  $C$  の値を十分に模擬する ( $K_A \approx \omega/\bar{A}$ ,  $K_C \approx C$ )

ときに、式(26)の分子がゼロ、すなわち

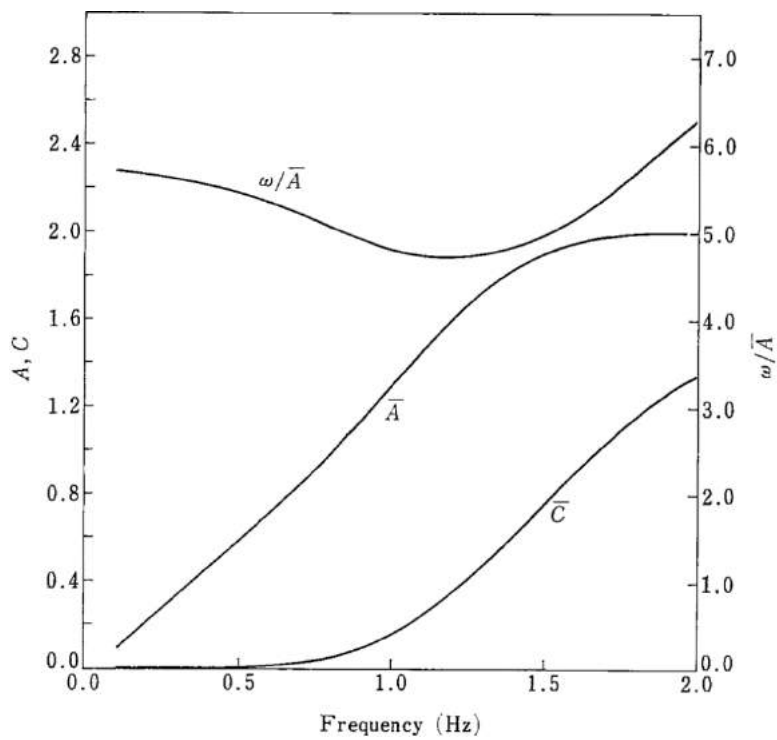
$$1 - V(j\omega) \cdot (K_A/\omega) \cdot [\bar{A} + j(\bar{C} - K_C)] = 0 \quad (17)$$

となって実現できることがわかる。

したがって、以下この条件について、の数値計算を行い、本方法の実用性の評価を行う。



**Fig.4 造波性能曲線**



**Fig.5  $\bar{A}$ ,  $C$ ,  $\omega/\bar{A}$**



## 4. 数値計算による性能検討

### 4.1 数値計算

まず，造波機－水槽系として

水槽条件：	水深 0.3m，幅 0.3m
造波板振幅：	最大±0.2m（ピストン方式）
駆動方法：	100W 直流電動機/ベルト駆動

を選定すると，波高性能曲線は Fig.4，また式(4)，(8)などで求めた  $\bar{A}$ ， $C$ ， $\omega/\bar{A}$  は Fig.5 のようになる。

直流電動機を用いたときの速度制御系伝達関数  $V(j\omega)$  は，付録に示す方法で計算できるので，残るについて 次の四つのケースにつき，式(15)，(16)を用いて， $|G_R|$  と， $|G_D|$  を計算する。

#### (1) ケース①（理想的 $K_A$ ， $K_C$ ）

一般に使用されている速度制御方法が，無反射造波に与える影響を把握するため， $K_A = \bar{A}$ ， $K_C = C$  という理想的増幅器の条件で計算。

#### (2) ケース②（一点での最適化）

$K_A$ ， $K_C$  が模擬すべき  $\omega/\bar{A}$ ， $C$  の値は，Fig.5 のようになるが，位相特性  $0^\circ$  という条件で，このようなゲイン特性を持った増幅器は，現在のアナログ回路では，不可能に近く，またデジタル回路には速度の点で問題がある。そこで，この造波機が多く使用されるであろう  $0.7\text{Hz}$  での  $\omega/\bar{A}$ ， $C$  の値を  $K_A$ ， $K_C$  として使用する。

$$\begin{aligned} K_A &= 5.207 \\ K_C &= 0.033 \end{aligned} \tag{18}$$

#### (3) ケース③（波形補正項を無視したとき）

$C$  は低周波側になるほどゼロに近づく。そこで  $C$  を無視して，

$$\begin{aligned} K_A &= 5.207 \\ K_C &= 0.0 \end{aligned} \tag{19}$$

#### (4) ケース④（加速度フィードバック）

$C$  を増幅器で模擬する代わりに，加速度  $\ddot{X}$  で  $CX$  を模擬させる。すなわち，定数  $K_C$  を用いて

$$K_C X(j\omega) = -K'_C \ddot{X}(j\omega) = K'_C \omega^2 X(j\omega) \quad (20)$$

から  $K_C = 0.005$  として模擬すると（このとき，位置フィードバック  $X$  の代わりに，加速度  $\ddot{X}$  をフィードバックして用いることになる）し， $K_A$  にはケース②③と同じ値を用いると，

$$\begin{aligned} K_A &= 5.207 \\ K_C &= 0.005\omega^2 \end{aligned} \quad (21)$$

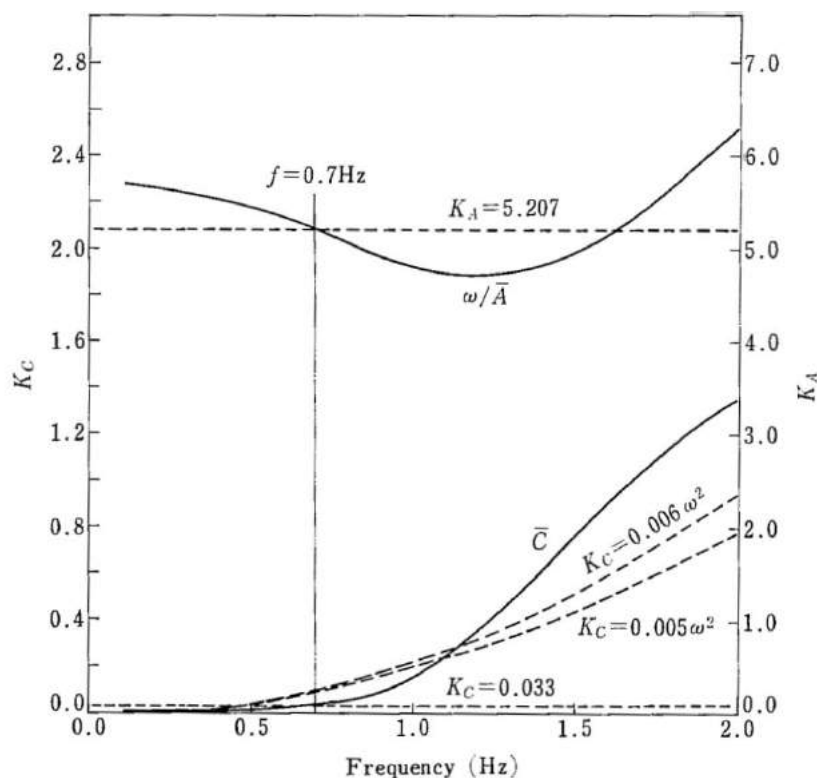
**(5) ケース⑤（加速度フィードバック）**

ケース④の条件を少し変え，

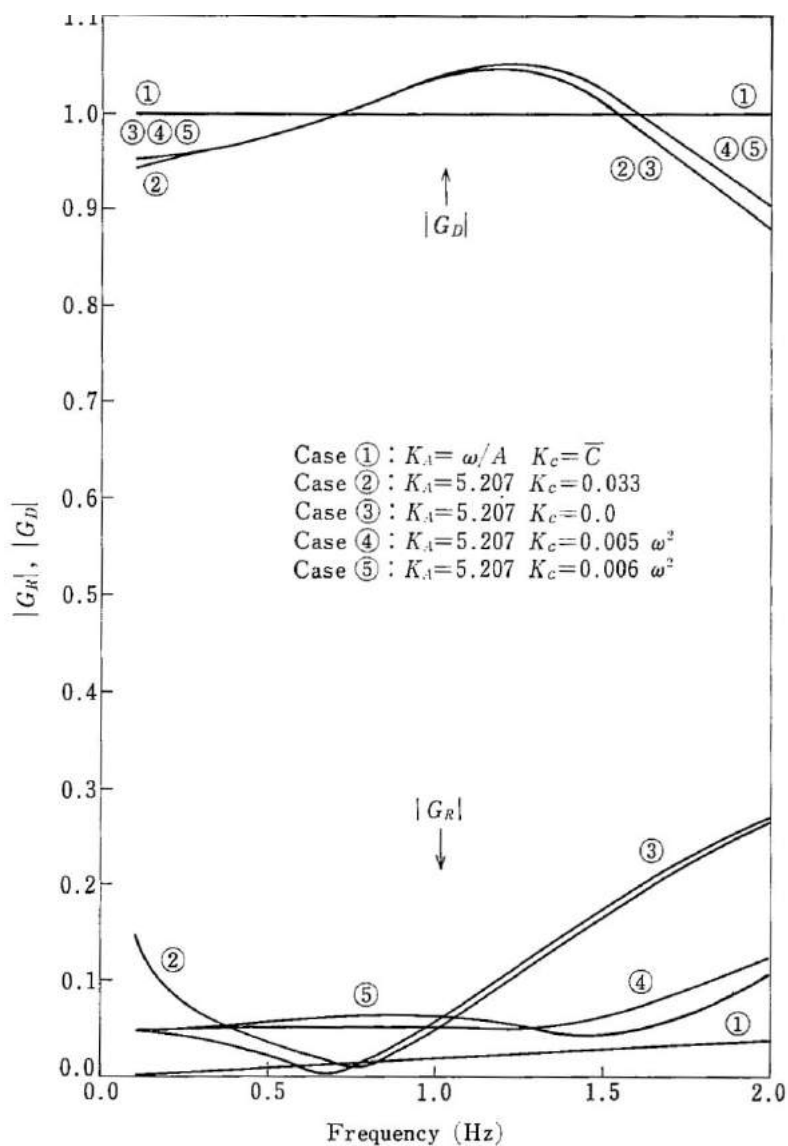
$$\begin{aligned} K_A &= 5.207 \\ K_C &= 0.006\omega^2 \end{aligned} \quad (22)$$

なお，各ケースで使用する  $K_A$ ， $K_C$  の値を  $\omega/\bar{A}$ ， $\bar{C}$  の値と比較するために，図示すると Fig.6 のようになる．

以上の条件で， $|G_R|$  と， $|G_D|$  を，0.1 から 2.0Hz の範囲で計算しボード線図で表現すると，Fig.7 のようになる．



**Fig.6  $K_A, K_C$**



**Fig.7 Frequency response  $|G_R|, |G_D|$**

## 4.2 考察

従来の位置制御型造波方法では、反射して戻ってくる波に対して造波板が応答できないため、 $|G_R|$ は1となり、また入力信号に対する造波波形の応答 $|G_D|$ は、主に $\bar{A}$ に支配されて周波数ごとに大きく変動する。これに比べ、Fig.7のいずれのケースも、 $|G_R|$ の性能が一段と向上していることがわかる。

Fig.7の各ケースの特徴を調べてみると、まず、 $K_A$ 、 $K_C$ に理想値を与えたケース①は、 $|G_R| \approx 0$ 、 $|G_D| \approx 1$ であり、通常用いられる速度制御方式が、無反射造波を行う上で十分な性能を有していると言える。

ケース②～⑤の消波性能 $|G_R|$ は、ケース②③が0.7Hz近辺で性能が良く( $|G_R| < 0.02$ )、高周波側で悪い( $|G_R| \approx 0.1 \sim 0.3$ )のに対し、ケース④⑤はフラットな、平均的に良い性能( $|G_R| \approx 0.05 \sim 0.1$ )を持っている。ケース②と③とでは、0.75Hzを境にして、また、ケース④と⑤とでは、1.25Hzを境にして性能が逆転しているが、これは、Fig.6が示すように、それぞれの周波数付近で、 $K_C$ のCへの近似度が逆転していることによると思われる。

Fig.7からは、ケース④⑤の $|G_R|$ の方がケース②③よりも優れているようにも見えるが、高周波になるほど波の減衰が大きいかを考えると、一概に断定できない。

また、ケース②の $|G_R|$ が一番悪いようにみえるが、この方法には任意の周波数で、 $K_A$ 、 $K_C$ を理想値にすることによって、周波数での性能はケース①と同じになるので、単一周波数の規則波実験などでは使用可能となろう。

ケース②～⑤の $|G_D|$ については、0.7Hzでケース①と同じ値( $|G_D| \approx 1$ )となり、それ以外の周波数でも、0.1～1.7Hzの範囲で $|G_D| \approx 0.95 \sim 1.05$ となっており、各ケースに $|G_R|$ ほどのバラツキがない。

これは、目標( $\eta_D$ )と実際( $\eta_I$ )の振幅が、5%の範囲で良く一致していることを意味し、不規則波実験などで非常に有利な結果をもたらす。すなわち、造波される波に任意のスペクトル特性を与えようとする際、位置制御型では、 $|G_R|$ 特性が周波数によって大きく変動するためその修正に煩雑な処理を要したが、この方法ではその必要が小さいことになる。

以上をまとめると、ここで示された波面検出・速度制御型無反射造波方法の性能は、数値計算という制約を割り引いても、従来の位置制御型に比べ

て、十分に優れたものと評価できる。また、 $K_A$ 、 $K_C$  の近似方法と性能に与える影響については、まだ議論の余地を残しているが、今後は実用上の問題とあわせて解決をはかるのが妥当と考える。

### あとがき

この報文の主要な結論は次のとおりである。

- 波面検出・速度制御型の無反射造波方法について、理論づけを行った。
- 造波機－水槽系の周波数応答モデルを作成し、造波板の動作と水路中の波の関係を明確にした。
- 数値計算によるケーススタディを行うことにより、本方法が従来の位置制御型造波方法に比べて優れた性能を持つことを示した。

本方法は、造波板後面の現象とは無関係に無反射造波を行うことができ、造波板の慣性重量の大小や、背面造波式とか背面空気式といった溝造と無関係に採用できるため、造波機として広い適用範囲を持つだけでなく、アクティブな消波装置としても種々の応用があると思われる。なお今後は試作機等により、更に検討を進めていく予定である。

### 参考文献

- 1) 谷本. ほか: 無反射性造波方式の試み, 第 30 回海洋工学講演会論文集 (1983) p51
- 2) S. H. Salter : Absorbing wave-makers and wide tank, Proc. of the Conf. on Directional Wave Spectra Application, (1981), p185
- 3) たとえば, 井島: 海岸工学, (1972), p20, 朝倉書店
- 4) たとえば, 高橋: システムと制御, (1968), p247, 岩波書店

## 付録 直流電動機 の速度制御性能の計算法

直流電動機による速度制御装置のブロック線図は、一般に Fig.A1 のようになり、その伝達関数  $V(s)$  は、次式で示される。

$$V(s) = \frac{\dot{X}}{\dot{X}_{REF}} = \frac{K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 (1 + T_F \cdot s)}{K_5 + K_6 \cdot s + K_7 \cdot s^2 + K_8 \cdot s^3} \quad (\text{A})$$

ただし、

$$\begin{aligned} K_4 &= \frac{A_1 \cdot A_2 \cdot S_{CR}}{K_E} \\ K_4 &= \frac{A_1 \cdot A_2 \cdot S_{CR}}{K_E} \\ K_5 &= \frac{K_E \cdot A_1 \cdot A_2 \cdot S_{CR} \cdot N_{FB}}{K_E} \\ K_6 &= \frac{K_E + A_1 \cdot A_2 \cdot S_{CR} \cdot N_{FR}}{375 \cdot K_E \cdot K_T} \\ K_7 &= \frac{R_a \cdot T_a \cdot GD^2 + R_a \cdot T_F \cdot GD^2 + C_{FB} \cdot A_2 \cdot S_{CR} \cdot T_F \cdot GD^2}{375 \cdot K_E \cdot K_T} \\ K_8 &= \frac{R_a \cdot T_a \cdot T_F \cdot GD^2}{375 \cdot K_E \cdot K_T} \end{aligned} \quad (\text{B})$$

ただし、

- K1: 指令速度－電圧変換 (V/(m/s))
- K2: ループゲイン調整 (V/V)
- K3: 回転－速度変換係数 ((m/s)/rpm)
- A1: 速度制御ゲイン (V/V)
- A2: 電流制御ゲイン (V/V)
- Scr: サイリスタ・ゲイン (V/V)
- Ra: 電機子抵抗 ( $\Omega$ )
- Ta: 電機子時定数 (sec)
- KT: トルク係数 (kgm/m)
- GD2: モータ軸換算全 GD2 ( $\text{kgm}^2$ )
- NFB: 速度フィードバック係数 (V/rpm)
- TF: 速度フィードバック時定数 (sec)
- CFR: 電流フィードバック係数 (V/A)

KR: 電圧係数 (V/rpm)

数値計算では、それぞれ Fig.A1 に示す値を使用している。ここで、 $K_1=10$  としたのは、波形  $\eta_0$  や造波板位置  $X$  の計測を、 $10V/m$  の感度で行うことを想定したため、また  $K_2$  の値は、 $V(j\omega)$  のループゲインが 1 になるよう定めたものである。 $K_3$  は減速機とベルトプリー径で定まる値である。その他の値は 100W 直流電動機のカタログ値を使用した。

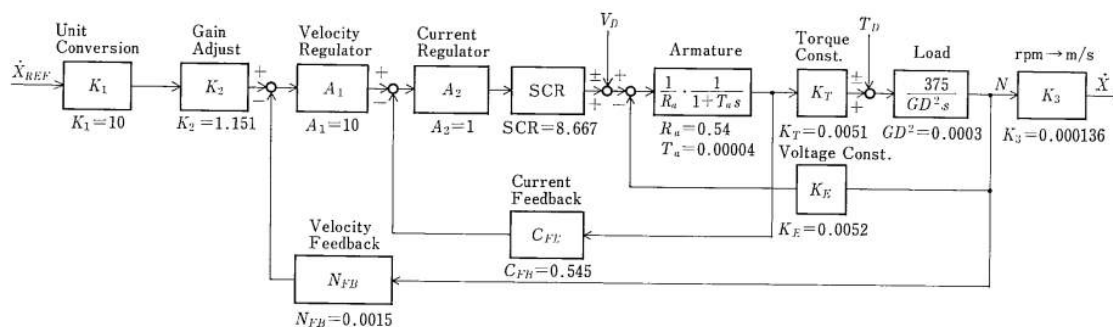
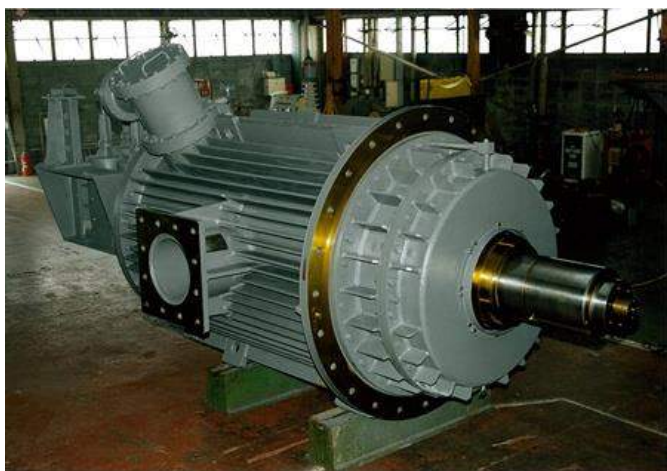


Fig.A1 Block Diagram of DC Motor Speed Control

付録 3 製作および設置  
大洗(20kW)および大分(1kW)



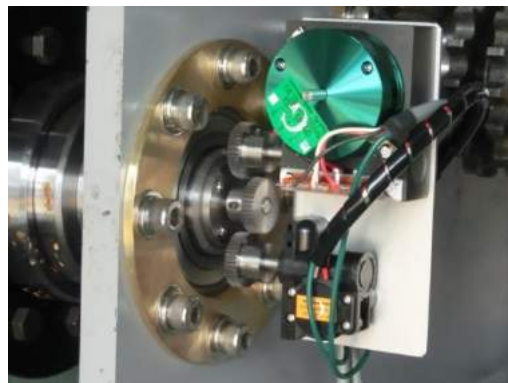
## 電気品工場製作



## 係留杭およびフロート製作



## 発電機および補機類の搭載



## ピンラック、ガイドローラのアライメント



## 工場作動試験



## 工場出荷



## 現地陸上組立

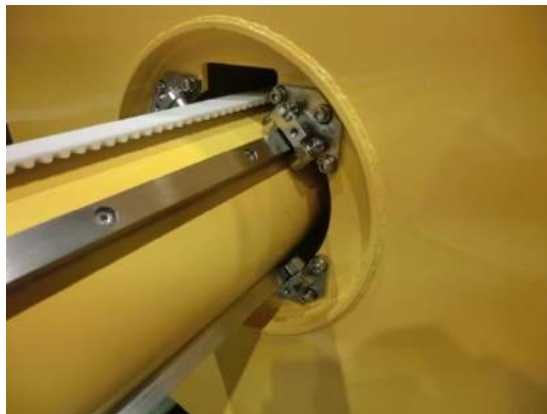
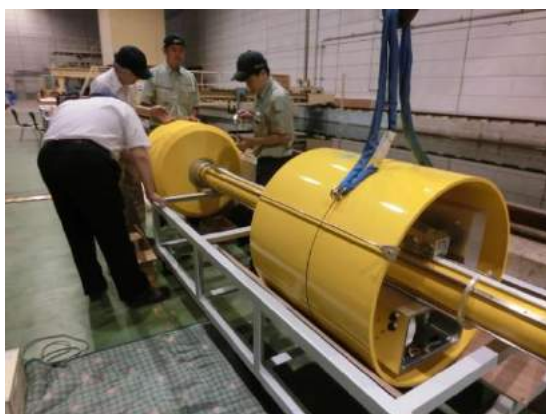
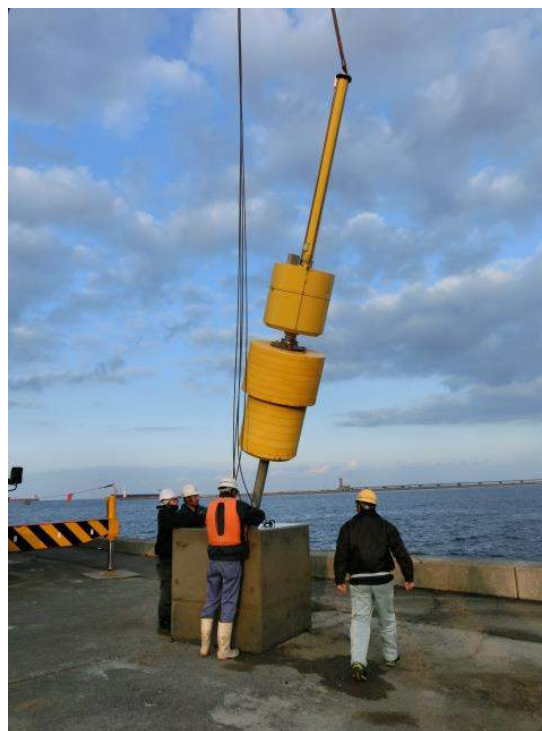
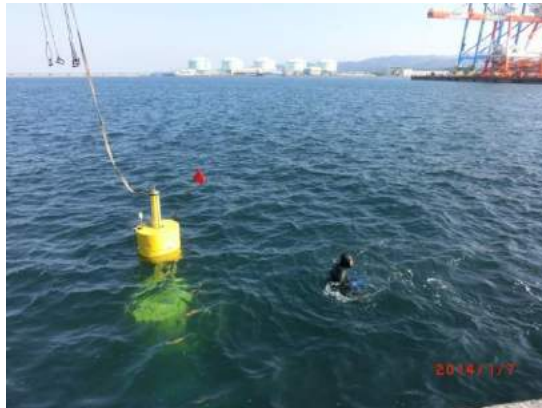
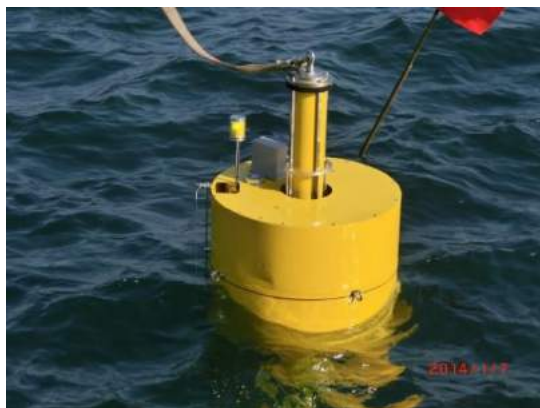




## 現地据付



# 1kW 小型 WEC の試作



## 付録 3 海洋環境への影響評価・分析

## 海洋環境（生物モニタリング）への影響評価

出典元：平成 27 年度環境省委託業務「小型で高効率な波力発電システムに関わる技術開発・実証事業（副題：大洗港における技術実証）」成果報告書 2015.2

### 【実施概要】

「小型で高効率な波力発電システムに係る技術開発・実証事業（副題：大洗港における技術実証）」の中で、「CO<sub>2</sub>削減効果・海洋環境への影響評価・分析」に関し、海洋環境に及ぼす影響について評価を行った。

発電設備設置後の実海域において、海生生物調査、水中騒音調査、波浪予測を行い、海洋環境への影響評価・分析を行った。

### 【実施内容】

#### ①海生生物調査

海生生物調査（潜水土によるライン調査と潮間帯生物調査）を行い、生物の出現状況等を把握するとともに、発電設備設置前後の比較を行った。また、波力発電装置周辺の生物調査も行った。調査は平成 27 年 10 月 26 日の 1 日で実施し、調査地点はライン 1 測点、潮間帯 1 地点を設定した。



図 1 海生生物調査実施エリア

#### ②水中騒音調査

波力発電設備近傍 1 点と離れた 2 点（計 3 点程度）で測定し、波力発電設備音の減衰等を把握した。調査は平成 27 年 10 月 15 日に 1 回実施し、調査地点は設備設置場所から防波堤に対して平行に、それぞれ 10m, 20m, 40m 離れた 3 地点とした。

### ③波浪予測

波浪変形予測を行い、波力発電装置設置による波浪変化を把握するとともに、海底の砂の移動に及ぼす影響を予測した。

検討手法は、波浪変形予測モデルとしてエネルギー平衡方程式を用い、構造物設置前後の有義波高分布の変化の予測により行った。また、底質の安定性を表す指標としてシールズ数を用い、底質を動かそうとする流体力を底質の抵抗力の比で表した。これにより底質移動の可能性を検討した。

## 【調査・予測結果】

### ①海生生物調査

海生生物調査（潜水土によるライン調査と潮間帯生物調査）を行い、生物の出現状況等を把握するとともに、発電設備設置前後の比較を行った。

本調査では、汀線（海岸線）から沖へ約 250m 付近までの範囲において潜水による海生生物の目視観察を行い、現状における生息・分布状況を把握した。また、発電設備設置及び海底ケーブルの設置前後で環境影響の評価を行った。なお、前回の調査は平成 25 年 11 月 30 日に同地点において実施されたものである。

#### a. 潮間帯生物調査

- ・潮間帯生物調査の目視観察方法は、生物の出現する飛沫帯から大潮平均干潮位付近の範囲について、ベルトトランセクト法により目視観察調査（50 cm×50 cm 方形枠）を行い、動植物の観察を行った。
- ・調査の結果、植物は褐藻植物門 1 種、紅藻植物門 14 種、その他 2 種の合計 17 種、動物は軟体動物門 8 種、節足動物門 3 種、棘皮動物門 1 種、その他 6 種の合計 18 種が出現した。鉛直分布では、上部にアラレタマキビ、コガモガイ、イワフジツボ、中層から下層にコケムシ綱、海綿動物門、ヒドロムシ綱などが分布していた。出現種は当海域で一般的にみられる種であった。
- ・前回調査と比較して、同様な種が出現し変化はみられなかった。

#### b. ライン調査



- ・ライン調査の目視観察方法は、GPS等を用いて基点位置を決定後、測線を設置し、調査測線上を1m×1m方形枠を用いた潜水士による動植物の目視観察を行った。
- ・調査の結果、植物は紅藻植物門2種、動物は海綿動物門1種、棘皮動物門1種の合計2種が出現した。海底地形は緩やかな砂底であり、一部岩盤が露出している箇所が存在していた。露出している岩盤は砂が堆積しており、海藻類の着生を阻害していると考えられる。
- ・海底地形は前回調査と比較して大きな変化はなく、動植物も同様な種が出現していた。

#### c. 波力発電装置周辺の生物調査

- ・発電設備周辺の生物調査の結果、植物は紅藻植物門2種、動物は軟体動物門2種、節足動物門1種、棘皮動物門3種、その他2種の合計8種、魚等の遊泳動物は軟体動物門1種、脊椎動物門5種の合計6種が出現した。

### ②水中騒音調査

茨城県大洗港における波力発電実証事業の実施に際し、発電設備等の供用に伴い発生する水中音の測定を行った。

#### a. 水中騒音レベル

- ・水中音圧レベルの測定結果（ $L_{Max}$ 、 $L_5$ 、 $L_{eq}$ ）および水中の音圧レベルと魚類の反応に係る既存の研究結果を下表に示す。
- ・発電設備は防波堤からおよそ80m程度離れている。調査地点付近では東向き的一定方向の潮流であった。
- ・設備音の最大値（ $L_{Max}$ ）について、設備からの距離が10mの地点において142.5 dBであり、魚類の威嚇レベルである140 dBを超えていた。20m以降の地点においては、威嚇レベル以下であった。90%レンジ上端値（ $L_5$ ）、等価音圧レベル（ $L_{eq}$ ）については、全ての地点において威嚇レベルを下回っていた。

表 2 水中音圧レベル調査結果

測定地点	L <sub>Max</sub>	L <sub>5</sub>	L <sub>eq</sub>
10m 地点	142.5dB	138.1dB	132.7dB
20m 地点	135.8dB	132.7dB	127.7dB
40m 地点	130.6dB	127.7dB	122.7dB

表 3 水中の音圧レベルと魚類の反応

段階	摘要	音圧レベル
感覚閾値	魚によく聞こえる 最小知覚レベル	60～80dB(特に感度の良い魚) 90～110dB(一般的な海産魚)
誘致レベル	魚にとって快適な音の強さ 興味のある音であれば音源方向に寄ってくる	110～130dB
威嚇レベル	魚が驚いて深みに潜るか、 音源から遠ざかる反応を示す	140～160dB
損傷レベル (致死レベル)	魚の内臓やうきぶくろの破裂	220dB 以上(水中穿孔発破の場合)

出典：「水中音の魚類に及ぼす影響」 p.16- p.17  
 ((社)日本水産資源保護協会 平成 9 年 10 月)より作成

b. 水中音の減衰特性

- ・測定地点付近の海域における水中音の減衰特性を図に示す.
- ・減衰特性から、設備音の最大値が魚類にとって威嚇レベルであるのは設備からおよそ 10 m 強の範囲内に限られることが確認された.

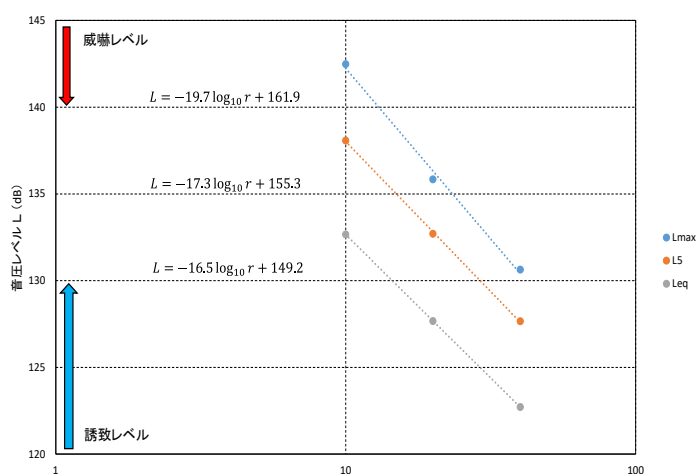


図 4 水中音の減衰特性

## ③波浪予測

波力発電装置設置における波浪変化を把握するとともに、底質の移動に与える影響を検討した。検討内容は、現況（設置前）の再現に加え、波力発電設備のうち実証機を10基配置したパターン、商用機を10基配置したパターンの3パターンとし、それに波浪条件として通年の平均値である通常波浪と最大波浪とした合計6ケースとした。

## a. 波浪変化

波浪分布の計算結果および波浪の変化の概要は下表に示すとおりであり、結果をまとめると以下のとおりとなる。

- ・発電装置設置により、波が遮られ、背後の波高が減少する。
- ・発電装置設置前後で、波浪が変化する海域は、発電装置周辺域のみである。

表5 波高分布の予測結果の概要

	通常波浪時	最大波浪時
現況	<ul style="list-style-type: none"> <li>・設置海域周辺では、通常波浪時では、砕波による波浪の減衰も少なく、ほぼ沖波の条件で入射する。</li> <li>・大洗港沖防波堤（南側の防波堤）により、波が遮蔽されることで、防波堤周辺、背後領域では、波浪も弱まり、静穏域（有義波高 0.25m 程度）が形成される。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・設置海域周辺では、最大波浪時は、有義波高 5m 程度で入射する。</li> <li>・大洗港沖防波堤（南側の防波堤）から大洗港内までは、波高 1m 以下となる。</li> </ul>
実証機設置	<ul style="list-style-type: none"> <li>・実証機設置により、波が遮蔽され、設置領域背後で波が弱まる。</li> <li>・実証機より離れたところでは、現況と同じ波高分布となる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・実証機設置により、波が遮蔽され、設置領域背後で波が弱まる。</li> <li>・実証機より離れたところでは、現況と同じ波高分布となる。</li> </ul>
商用機設置	<ul style="list-style-type: none"> <li>・商用機設置により、波が遮蔽され、設置領域背後で波が弱まる。</li> <li>・商用機より離れたところでは、現況と同じ波高分布となる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・商用機設置により、波が遮蔽され、設置領域背後で波が弱まる。</li> <li>・商用機より離れたところでは、現況と同じ波高分布となる。</li> </ul>

表 6 波浪の変化の概要

	通常波浪時	最大波浪時
実証機設置	<ul style="list-style-type: none"> <li>背後領域では、通常波浪時で 300m 程度まで変化するが、設置前より大きくなることはない。</li> <li>設置範囲以外での、波浪の変化はみられない。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>背後領域では、最大波浪時では、大洗港防波堤付近まで、波高が変化するが、設置前より大きくなることはない。</li> <li>設置範囲以外での、波浪の変化はみられない。</li> </ul>
商用機設置	<ul style="list-style-type: none"> <li>背後領域では、通常波浪時では、大洗港防波堤付近まで、波高が変化するが、設置前より大きくなることはない。</li> <li>設置範囲以外での、波浪の変化はみられない。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>背後領域では、最大波浪時では、大洗港防波堤付近まで、波高が変化するが、設置前より大きくなることはない。</li> <li>設置範囲以外での、波浪の変化はみられない。</li> </ul>

## b. シールズ数変化

シールズ数の分布及び変化の概要は下表に示すとおりであり、結果をまとめると以下のとおりとなる。

- ・発電装置設置前では、シールズ数は通常波浪時で 0.1 程度の海域であり、砂は動く海域である。
- ・発電装置設置により波高が減衰することで、移動限界シールズ数（本海域では 0.0585）以下となり、砂が動かなくなる領域が形成される。
- ・発電装置設置前後でシールズ数が増加する海域は発電装置周辺域のみである。

表 7 シールズ数分布の概要

	通常波浪時	最大波浪時
現況	<ul style="list-style-type: none"> <li>陸から 3km 程沖合では、シールズ数が限界シールズ数以下となり、砂は動かない。また、大洗港沖防波堤により波浪が遮蔽されるので、大洗港内でも、限界シールズ数以下の領域がみられる。</li> <li>設置海域周辺では、シールズ数は 0.1 程度となり、現況において砂は動く海域である。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>限界シールズ数以下となり、砂が動かなくなる領域は、沖合の大水深帯や、大洗港内、大洗港沖防波堤の背後の領域に限られる。</li> <li>設置海域周辺では、ほぼシールズ数は 1.0 以上となり、砂が層状に移動するシートフローの状態となる。</li> </ul>
実証機設置	<ul style="list-style-type: none"> <li>実証機背後 200m 程の領域では、波浪が減衰することで、シールズ数が限界シールズ数以下となり、砂が動かなくなる領域が形成される。</li> <li>実証機から離れたところでは、シールズ数が 0.1 程度である。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>実証機により、波浪が減衰するが、限界シールズ数以下となる領域は、実証機背後数十 m の領域に限られる。</li> <li>実証機から離れたところでは、シールズ数は 1.0 以上となる。</li> </ul>

商用機設置	<ul style="list-style-type: none"> <li>・実証機背後 250m 程の領域では、波浪が減衰することで、シールズ数が限界シールズ数以下となり、砂が動かなくなる領域が形成される。</li> <li>・実証機から離れたところでは、シールズ数が 0.1 程度である。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・商用機により、波浪が減衰するが、限界シールズ数以下となる領域は、商用機背後数十 m の領域に限られる。</li> <li>・商用機から離れたところでは、シールズ数は 1.0 以上である。</li> </ul>
-------	--	--

表 8 シールズ数変化の概要

	通常波浪時	最大波浪時
実証機設置	<ul style="list-style-type: none"> <li>・シールズ数が増加する領域は、実証機設置位置～大洗港防波堤の範囲である。</li> <li>・実証機設置により、大洗港や周辺の砂浜のシールズ数に変化はない。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・シールズ数が増加する領域は、実証機設置位置～大洗港防波堤の範囲である。</li> <li>・実証機設置により、大洗港や周辺の砂浜のシールズ数に変化はない。</li> </ul>
商用機設置	<ul style="list-style-type: none"> <li>・シールズ数が増加する領域は、商用機設置位置～大洗港防波堤の範囲である。</li> <li>・商用機設置により、大洗港や周辺の砂浜のシールズ数に変化はない。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・シールズ数が増加する領域は、商用機設置位置～大洗港防波堤の範囲である。</li> <li>・商用機設置により、大洗港や周辺の砂浜のシールズ数に変化はない。</li> </ul>

## c. 底質移動に与える影響

底質移動に与える影響範囲は下表に示すとおりであり、結果をまとめると以下のとおりとなる。

- ・発電装置設置前後で、砂の移動形態が変化する（砂が動かなくなる）海域は、発電装置周辺域のみである。
- ・周辺海域での移動形態に変化はない。

表 9 挙動判定結果の概要

波浪	発電装置	挙動変化範囲 (発電装置設置海域)	挙動変化範囲 (発電装置設置海域以外)
通常波浪	実証機	実証機背後 200m×75m	挙動変化なし
	商用機	商用機背後 250m×160m	挙動変化なし
最大波浪	実証機	実証機背後 25m×100m	挙動変化なし
	商用機	商用機背後 25m×175m	挙動変化なし

### 漁礁としての活用可能性

今回設置した波力発電装置周辺にはイシダイ、アイナメ、タコなど岩礁に生息する魚介類が生息していることがわかった。設置場所のすぐ近くに岩礁域があり、周辺から移動してきたものと考えられる。(図 8.4)

また、波力発電設備からの水中音は、発電装置から 10m 以内においては装置から発生する音の最大値が魚類にとって威嚇レベルである 140dB を超えることがわかった。しかし、装置周辺においては魚等の遊泳動物の出現が確認されており、装置から発生する音の影響よりも、装置が存在することによる漁礁としての効果の方が大きいと考えられる。

一般的に漁礁等の構造物を設置した場合には、流れの変化、餌生物の付着、隠れ場の創造などにより魚類等が蟄集することが知られており、今回の装置設置により同じ効果がみられ、設置された波力発電装置が漁礁としての活用が可能であることを示唆していると考えられる。



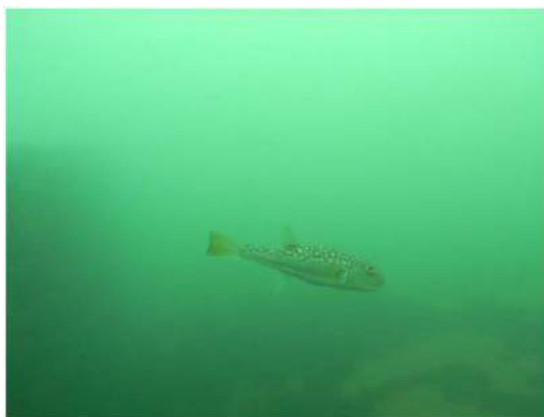
(ウミタナゴ属)



(イシダイ)



(アイナメ)



(コモンフグ)



(マダコ属)



(レイシガイ, ヒメヒトデ属, ムラサキイガイ)

図10 海生生物調査時に発電設備周辺で確認された生物

まとめ

#### 【海生生物調査】

海生生物調査で出現した種類は、一昨年 11 月に事前調査として実施した同じ地点の結果と比較して、潮間帯生物調査、ライン調査とも結果はほとんど変わらず、波力発電装置の設置による海生生物への影響は小さいものと考えられた。また、重要種（植物、動物）については今回の調査では確認されなかった。

波力発電装置周辺にはイシダイ、アイナメ、ウミタナゴ、タコなどが生息していることが確認され、装置設置による魚礁効果が見られた。

#### 【水中騒音調査】

調査結果より、発電設備から 10m 以内においては設備から発生する音の最大値が魚類にとって威嚇レベルである 140dB を超えることがあるが、装置周辺においては魚等の遊泳動物の出現が確認されていることから、装置から発生する音の影響は小さく、装置が存在することによる魚礁としての効果の方が大きいと考えられる。

#### 【波浪予測】

検討の結果、発電設備設置前後で波浪は変化するものの、変化が生じるのは、発電設備から大洗港防波堤までの領域に限られる。それ以外の海域では、通常波浪時ならびに最大波浪時においても、波浪の変化がないことがわかった。

また、底質の安定性を示すシールズ数により、底質移動の可能性を把握した結果、シールズ数が変化するのは、発電装置周辺に限られた。

シールズ数を基に、底質の挙動が変化する領域を算定した結果、通常波浪時で、実証機背後の 200m×25m の領域、商用機背後の 250m×25m の領域で、設置前では砂は動く状態であるが、設置後では、砂が動かなくなる。設置海域自体は、砂が動く海域であるため、このような海域では設置前に比べて砂が溜まりやすくなると考えられる。

これらの結果から、影響は発電設備の背後に限られるが、設備の設置に伴い離岸堤のような消波効果や堆砂効果が期待できると考えられる。周辺海域、サンビーチの砂浜など離れた海域に対する影響に関しては、設置前後で、波高・シールズ数・移動形態ともに変化がないことが確認され、設置による影響は小さいと考えられる。



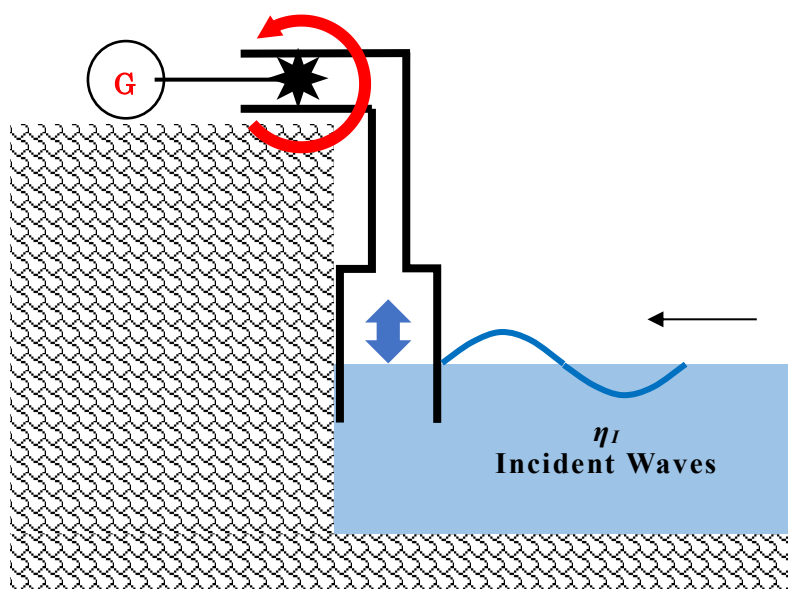
## 付録 4 振動水柱型波力発電機の考察

## リアクティブ制御が可能な振動水柱型波力発電機

振動水柱型波力発電機は日本でスタートした技術であるが、その技術は停滞しているように見える。その最大の原因は、多くの試みにもかかわらず、共振帯域が広くできないことにあるように見える。

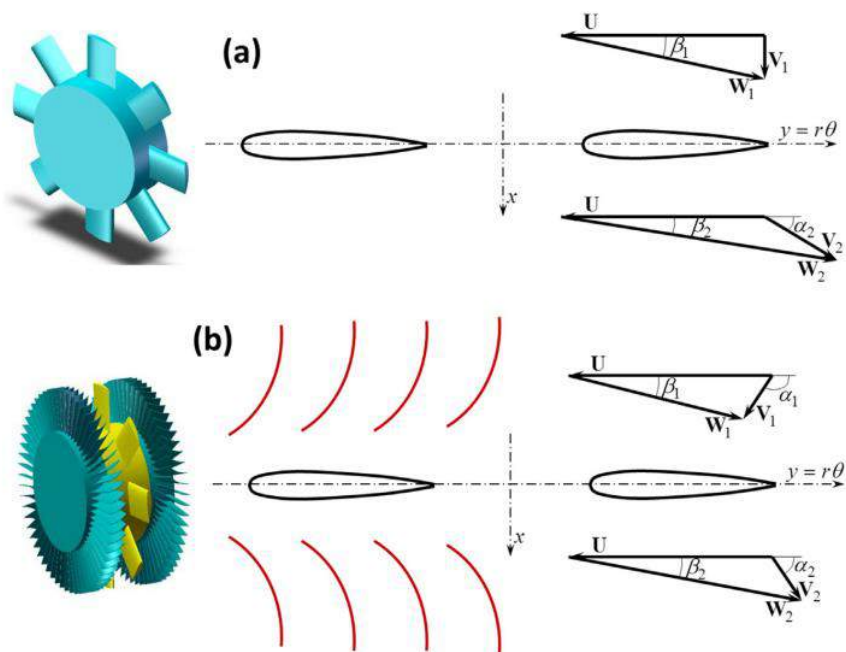
振動水柱型波力発電では、空気流をタービンの回転に変換して発電機を回転させている。普通使用されるタービンは、送風機の機能は持っていないので、リアクティブ制御はできないため、電氣的な同調を起こすことはできない。

(Falcao and Henriques, (2016) Oscillating-water-column wave energy converters and air turbines: A review)

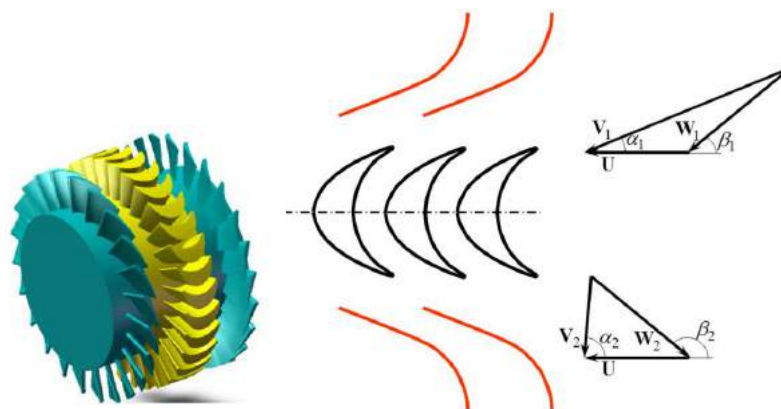


振動水柱型波力発電では、往復気流中でも常に同一方向に回転する特殊なタービンがしばしば使用されている。このような波力発電用往復流型タービンとしてウェルズタービンと、衝動型タービンがある。しかしこの方式ではリアクティブな制御を行うことはできない。これは、波エネルギーがそれほど大きくない日本では、弱点になると思われる。

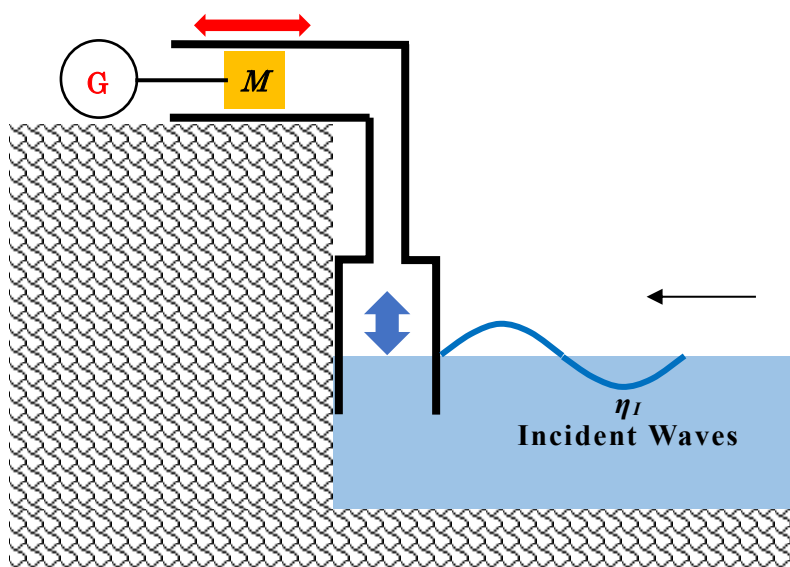
送風機を使えば、波を造ることができるので、リアクティブな制御が可能になるが、直動システムを使用して、空気シリンダー型で、振動体を前後運動させ、発電する方が、費用的に優れているように見える。



ウエルズタービン



衝動タービン



これを上下振動型浮体と比べてみる。

以下のようなメリットがあることがわかる。

- 海中の振動体(浮体)が，空気シリンダー内にあるため，損傷を受けにくい。
- ラックピニオンなども海中仕様が不要．発電機も地上に設置できる。
- 浮力と無関係に振動体の重量が自由に選べる．機械的同調も行いやすい。
- 空気シリンダーの断面積が自由に選べるので，設計に都合の良い力と速度が得られる。

