

# 浮体-釣合錘式波力エネルギー変換装置の 力学検討

Study on the Mechanics of the Float-Counterweight Type  
Wave Energy Conversion Device

平成 22 年 9 月

種浦 圭輔

山口大学大学院理工学研究科

# 浮体-釣合錘式波力エネルギー変換装置の力学検討

1.	緒論	1
1.1	自然エネルギー利用技術の現状	1
	(1) 太陽光発電と太陽熱利用	2
	(2) 風力発電	3
	(3) 雪氷熱利用	3
1.2	波エネルギーの賦存量	4
1.3	波エネルギー利用技術	6
	(1) 波エネルギー技術全般	6
	(2) 種々の可動物体波力エネルギー変換技術	9
	(3) 新しい提案	14
	(4) 本研究の内容	14
	参考文献	15
2.	浮体-釣合錘式波力エネルギー変換装置の力学モデル	17
2.1	力学モデルの構築	17
	(1) 第1モデル	18
	(2) 第2モデル	20
2.2	力学モデルの検証	21
	(1) 実験装置と方法	21
	(2) 実験結果	24
	(3) モデルの検証方法	25
	(4) モデルの検証	26
2.3	実海域用装置の力学計算	29
	(1) ラディエーション流体力と波強制力の評価	29
	(2) 各波高における平均発生電力	31
	(3) 各波高における最大ワイヤ張力	32
	(4) 各波高における最大トルク	34
2.4	結語	36
	参考文献	37
3.	浮体-釣合錘式波力エネルギー変換装置の共振特性解析	38
3.1	共振解析理論	38
	(1) 固有振動数と変位応答倍率	39
3.2	計算結果	39
	(1) フロート変位による検討	39
3.3	結語	40
	参考文献	41

4.	共振特性解析によるシステムの高出力・高効率化の諸元の検討	42
4.1	共振特性解析を利用した高出力・高効率化の検討	42
4.2	数値的検討	42
	(1) 駆動プーリ径の諸元の検討	42
	(2) ギア比の諸元の検討	47
	(3) 各波高による平均発生電力, ワイヤ張力およびトルク	49
	(4) 装置の最適諸元の検討	62
	(5) ケーススタディー	65
4.3	結語	70
	参考文献	71
5.	結論	72

# 第1章 緒論

近年、地球規模での環境問題の重要課題として CO<sub>2</sub> 排出による地球温暖化の議論が活発化している。地球温暖化の結果として冷夏・長雨による冷害、集中豪雨、大干ばつ、大洪水など著しい異常気象が現れているとの見方が有力である。そのようなことから、CO<sub>2</sub> 排出の抑制を国際的課題として取り上げ、CO<sub>2</sub> 削減の目標値を設定し、その達成に向けて CO<sub>2</sub> 排出に課税する炭素税、エネルギー効率の改善、自動車の CO<sub>2</sub> 排出量の削減、さらに最も期待されている再生可能エネルギーの利用が謳われている。EU では風力をはじめ太陽光・熱・バイオマス・水力などの再生可能エネルギーの利用を積極的に進めている。

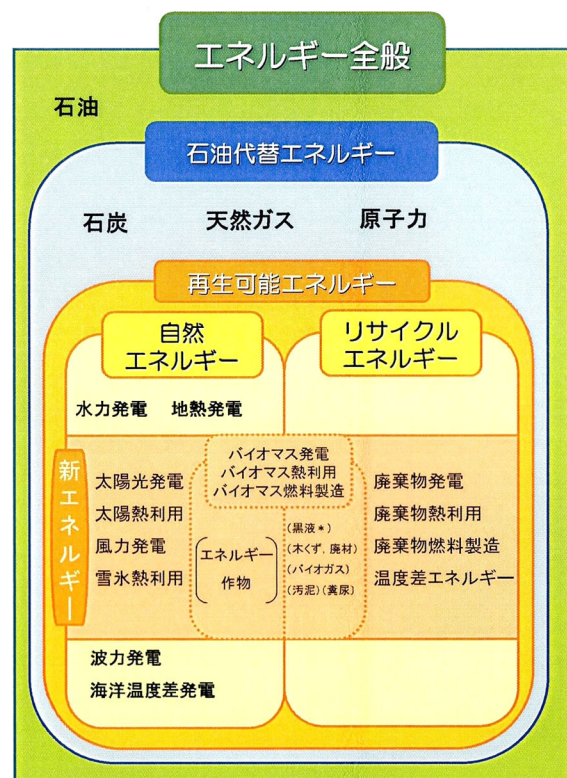
特に、地球規模で考えたエネルギー供給を、つまり現在の先進国および開発途上国も等しく人類の英知であるエネルギー供給に浴するという視点で考えた場合には、いかに再生型自然エネルギー利用が重要であるかが分かる。

本論文では、賦存量が大きい再生可能エネルギーの一つである波力エネルギーの利用技術として、『浮体-釣合錘式波力エネルギー変換装置』に焦点を当て、その力学検討を行っている。

本章では、まず、現在までの自然エネルギー利用技術の現状、特に波エネルギー利用技術の現状を述べる。そして、波エネルギーの賦存量を示し、これまで世界中または日本で行われた波エネルギー利用の技術開発を紹介し、最後に本研究の対象である『浮体-釣合錘式波力エネルギー変換装置』について簡単に説明する。なお、波力エネルギー変換と同様の意味で波力発電という用語もよく用いられる。本論文では、これら2つの用語を文脈に沿った形で、同じ意味で用いる。

## 1.1 自然エネルギー利用技術の現状

自然エネルギーは通常、再生可能エネルギー (Renewable Energy) と呼ばれ、自然界に存在し繰り返される現象によるエネルギー流に由来しており、自然界の営みによって利用するのと同程度以上の速度で再生されるエネルギー源のことを指す<sup>1)</sup>。ここでは1997年に成立し、2008年に政令改正した日本国の新エネルギー法を基に再生可能エネルギー技術を紹介する。同法によると、新エネルギーは図-1.1に示すように、「自然エネルギー」と「リサイクルエネルギー」の2本立てとして、再生可能エネルギーと従来型エネルギーの新利用形態を目指し、「技術的に実用化段階に達しつつあるが、経済性の面から普及が十分でないもので、石油に代わるエネルギーの導入を図るために特に必要なもの」と定義されている<sup>2)</sup>。そのため、研究開発段階にある波力発電などは、自然エネルギーであっても新エネルギーには指定されていない。



\* : 黒液とはパルプ製造工程の時に出る廃液

図-1.1 新エネルギーの分類図-

### (1) 太陽光発電と太陽熱発電<sup>3)</sup>

図-1.2 は 2008 年までの太陽電池の年間生産量<sup>4)</sup>を示している。それによると、欧州やその他の地域で生産の増加が著しいが、日本は 2005 年以降において、生産量の増加が鈍化している。これは新エネルギー財団の補助金制度が 2005 年度に打ち切られたことが一因と考えられる。現在実用化されている太陽電池は、主にシリコン (Si) 系半導体を用いている。しかし、日本の太陽電池製造は、精製した高純度の Si (シリコン) の原材料不足のため、生産計画が達成し難い状況になっている。Si 結晶系太陽電池の変換効率は約 25%と高いが、原材料に Si を大量使用するので、一般の半導体製造と競合することになる。このことも生産量が伸び悩んでいる原因とみられる。このため、変換効率は現時点では 10~12%程度と低いものの、Si 材料の使用量が少なく済む薄膜型太陽電池が増えている。特に薄膜型太陽電池は高温での出力低下が少ないので、熱帯や砂漠地帯の日照の強い場所での使用に適すると評価されている。また、銅 (Cu)、インジウム (In)、ガリウム (Ga) など主材料とする金属化合物系太陽電池 (SIS 太陽電池) も実用化段階に入った。

次に太陽熱利用について述べる。太陽光は、晴天日には地表に約  $1\text{kW/m}^2$  のエネルギーを降り注ぐ。これを熱源として天日槽を設置して風呂用に給湯する装置はすでに普及している。この原理を利用し、規模の大きな装置で水などの媒体を加熱して蒸気を発生させ、タービンを回して発電機を駆動するシステムである。太陽光を熱源として蒸気を発生させるには光を集中させることが必要であるが、その集光・集熱の方法は現時点で 3 種類が用いられている。それは、『タワー集光型』、『曲面集光型』そして『ディッシュ型』である。まず、図-1.3 に『タワー集光型』太陽熱発電を示す<sup>5)</sup>。これはタワーをもち、地上に配置された反射鏡からの光をタワー上部の集熱部に集め、集熱器による熱媒の水を加熱し、蒸気を発生させてタービンを回す方式である。1996 年以降、米国のカリフォルニア州モハベ砂漠で出力 100MW 規模の商用プラント技術の実証試験が継続されている。日本では、1980 年から 6 年間にわたり、香川県三豊市仁尾町において 1MW 規模の『タワー集光型』と『曲面集光型』太陽熱発電装置の設備を設けて試験が行われた。このプロジェクトによって技術的データの蓄積は得られたが、実証試験のみで終了している。

太陽光発電、太陽熱発電に共通することとして、表面に塵が付着して太陽のエネルギーを有効に取れなくなる。このためのメンテナンスが必要である。

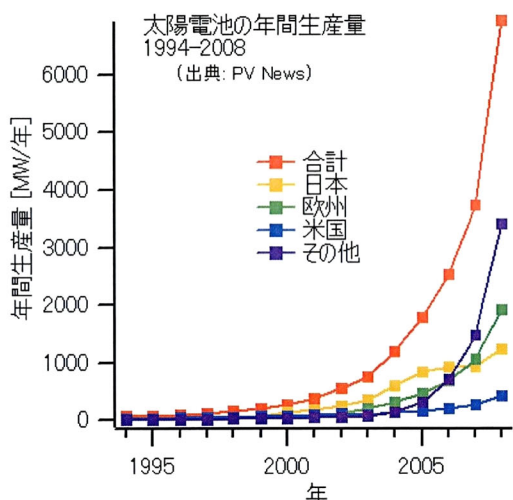


図-1.2 太陽電池の年間生産量<sup>4)</sup>  
(出典: PV News)

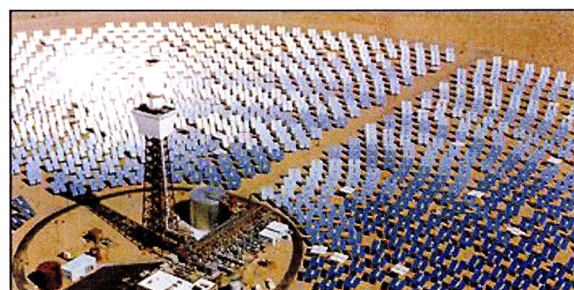


図-1.3 カリフォルニア州モハベ砂漠にある『タワー集光型』太陽熱発電<sup>5)</sup>  
(出典: ウィキペディア)

## (2) 風力発電<sup>3)</sup>

風力エネルギーは風速3乗に比例する<sup>6)</sup>。風力は、近年ではクリーンエネルギーの代表として脚光を浴び利用が伸びている。具体的には、全世界の風力発電能力が、2000年に18,000MWであったが、2006年には75,000MWと4倍になっている。特に欧州や米国ではその利用が進んでおり、デンマークでは電力需要の20%以上を風力発電で賄っている。風車の能力は受風面積に比例するため、大型化がはかられ、近年では、業務用には直径60～70m 定格出力1,000～1,500kW程度のものが主流となっている。また「風の息」の現象により、出力が変動し、不安定な電源であるという欠点を持っている。特に風力発電装置が変電所から離れた位置にある場合や周辺の電力負荷が少ない場合などには、風力発電の変動が電圧変動や周波数変動として現れるなどの悪影響が出る。このため我が国の電力会社はその管内での風力発電容量の限度を設けて対応しているのが現状である。また、洋上では陸上に比べ安定して高風速が得られるので、1990年頃から世界各国で洋上に風力発電施設が建設されるようになった。海上風の特徴<sup>7)</sup>として、海上の風速は陸上に比較して強勢で、沿岸から離れた海域では、約20%の風速の増加がみられることがある。次に、大気/水面の温度差が大気/陸地の温度差よりも小さいため、洋上では風速変動が陸上に比べて少ない。このため、風車やブレードが受ける機械的な疲労が小さくなり、結果として、風力発電システムの寿命が長くなる。また海上では陸上に比べて鉛直方向の風速の変化が少ないため、陸上のように高風速を求めてタワーを高くする必要がない。もう一つの特徴として、陸上では山風、谷風とその移り変わりなどにより風向、風速の変化が著しいが海上ではそのような現象がなく、陸上に比べて時間帯による風速変動が少ない。したがって、洋上風力発電では発電システムの設備利用率が、陸上に比較して高くなる。このようなことから、スウェーデン、オランダ、デンマーク、イギリスなどで700MWの総設備容量の洋上風力発電が導入されている。

## (3) 雪氷熱利用<sup>8)</sup>

雪氷熱利用では、雪や氷、人工凍土を冷熱源として、冷気や冷水を夏季に利用するものである。雪を利用する場合は断熱した倉庫に雪を貯蔵し、氷を利用する場合はアイスシェルターと呼ばれる製氷・貯氷庫を用い、冬期間、寒冷な外気を利用して水を凍結させる。人工凍土を利用する場合は貯蔵庫など施設周辺の土壌をヒートパイプにより人工的に凍らせる。雪氷熱利用の特徴として以下の点が挙げられる。

1. 冷凍機やクーリングタワーを使用しないため、運転に必要なエネルギーが少なく、騒音や排熱も少ない。
2. 都市では夏に冷房機使用により、外気温が上昇するヒートアイランド現象が問題となっている。これを低減する有効なシステムであり、環境面での貢献度が高い。
3. 直接熱交換冷風循環方式の場合、冷房室に供給される空気は湿度が高く、冷房室内での乾燥を防ぐことができるので、農産物の保存に適する。また、喉を痛めないため快適な居室冷房などに適している。
4. 雪を用いる直接熱交換冷風循環方式では、雪の濡れた表面が空気中の塵芥や水溶性ガスを吸着する性質があり、空気を浄化する作用があるため、クリーンルームへの応用などに期待されている。

## 1.2 波エネルギーの賦存量

前節で紹介したように、波力発電は日本の新エネルギー法では、研究開発段階とみなされ、「新エネルギー」の定義から外れている。しかしながら、波エネルギーには大きな可能性がある。その利用技術の歴史はかなり古く、18世紀後半のフランス人ジラルドの特許まで遡る<sup>9)</sup>。波エネルギーの起源として、海の波は主に海洋上を吹く風によって発生する。そして進行波としてエネルギーを輸送・伝播する。したがって、風のない海域までエネルギーを輸送することができる。また、密度は空気に比べて約800倍と高いため、変動周期が長く風力に比べてはるかに安定している。

次に世界の波パワー分布を図-1.4に示す。最高で102kW/mの値が見られる。また、地球規模の波力資源について、G.L.Wick および W.R.Schmitt<sup>10)</sup>は、「平均的な波周期は8秒で、有義波高は1.5mに達し、この値を世界の海洋について積分すると $2.7 \times 10^{12} \text{W}$ 、すなわち27億kWになり、さらに、この波エネルギーを風エネルギーと共に効率よく取り出すと、700億kWに増大させることができる。」と述べている。したがって、図より高緯度地域で波パワーが高い値を示し、風エネルギーと対応していることから、彼らの試算は、大きな可能性をうかがわせる。

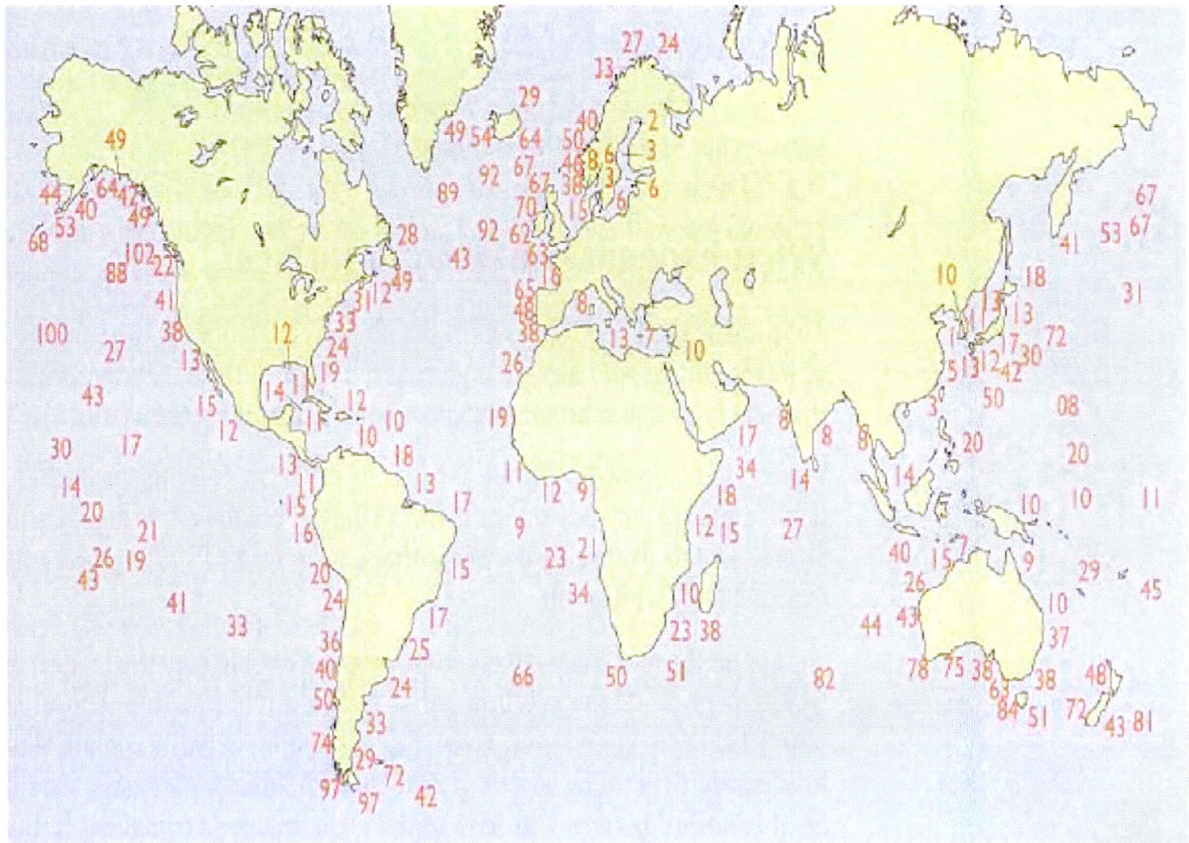


図-1.4 世界の波パワー分布 (kW/m)<sup>11)</sup>

次に、日本の波エネルギーについて説明する。日本の海岸線長さは31,709kmで、波パワーは平均13kW/mと評価されており、海岸線全長について波パワーを見積もると、約 $4.0 \times 10^8 \text{kW}$ になる。図-1.5は日本周辺の波パワー分布を示している。それによると、波パワーは日本海側や太平洋側で大きな値を示しているが、東シナ海など水深が浅く、フェッチが短い海域では比較的小さい。現在、未利用沿岸域において、波が高い故に利用されていない場合が少なくない。そこで、沿岸海域の開発に必要と

されるエネルギーを供給するとともに、静穏海域をつくる機能をもつ波浪エネルギー利用技術への期待が高い。図-1.6と図-1.7は、それぞれ日本海側と太平洋側の例として酒田と鹿島における月別の波パワーを示している。日本海側では夏と冬とで、波エネルギーに大きな差があり、エネルギーは冬に大きく夏に小さい。このことは、冬の電力需要が大きい時により大きな波エネルギーを獲得できるというタイムリー性を示し、波エネルギーの大きな魅力である。

しかしながら、耐久性、設置・維持補修容易性、経済性を満足する波力エネルギー変換技術が出現しておらず、波力エネルギー技術はまだ研究段階に留まっている。次節では、これまで提案された波エネルギー利用技術を世界と日本について詳細に説明する。

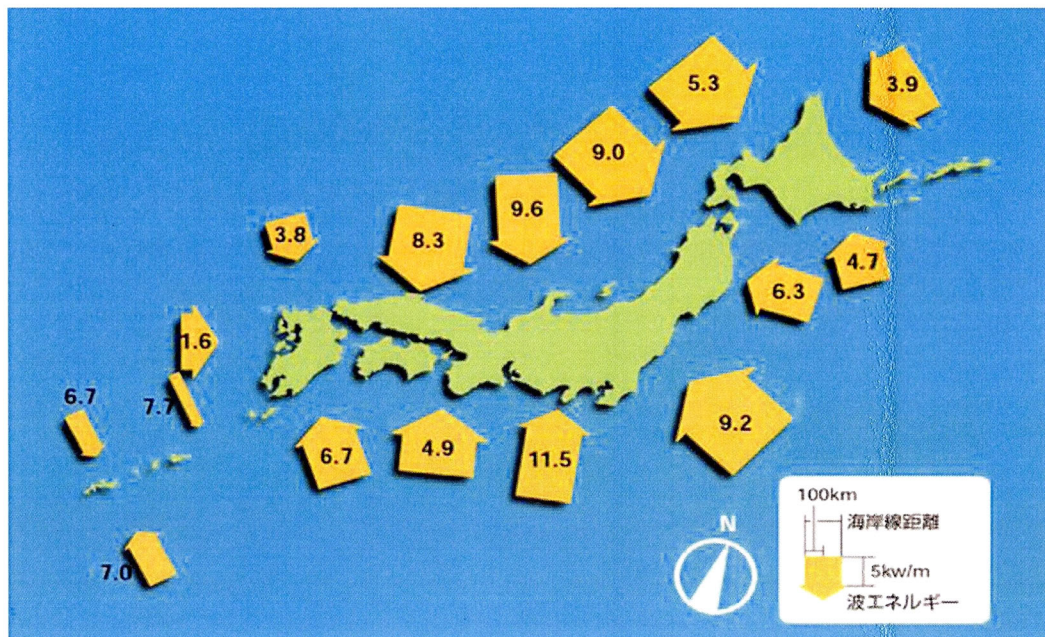


図-1.5 日本周辺の波パワー分布<sup>12)</sup>

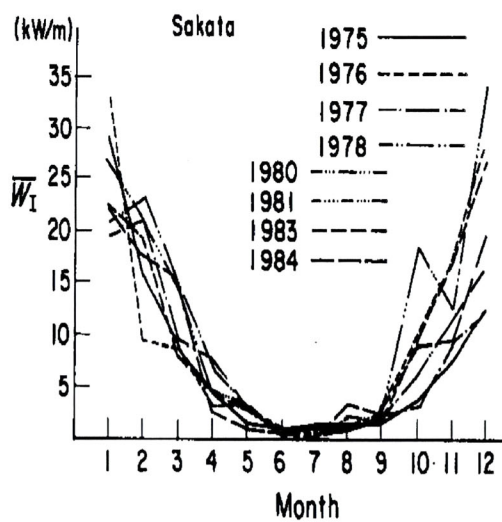


図-1.6 日本海側の月別の波パワー (酒田)<sup>12)</sup>

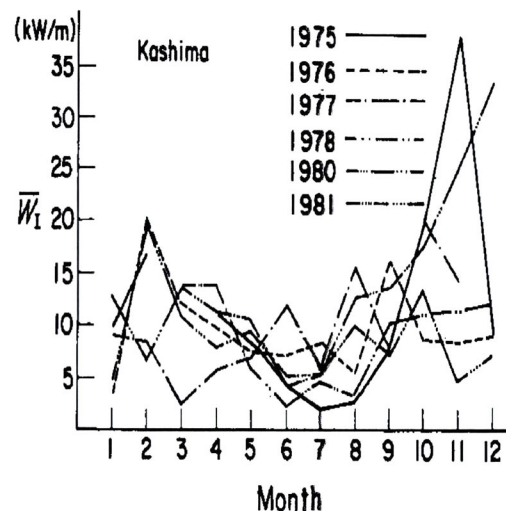


図-1.7 太平洋側の月別の波パワー (鹿島)<sup>12)</sup>



### 1.3 波エネルギー利用技術<sup>9)</sup>

#### (1) 波エネルギー技術全般

表-1.1 は世界と日本の主な波エネルギー利用技術の開発の系譜を示している。

表-1.1 世界および日本の波力エネルギー変換技術の開発の系譜

世界		日本
1799	ジラール (フランス)	
1898	リンデン (イタリヤ) ライト	
	世界初の波力エネルギー利用装置の特許 波力エネルギー推進船を試作 浮体の上下動で油圧ポンプを動かし動力を得る装置の特許	
	フランス人	
1919		振り子及び空気圧縮方式の現地実験
1965		益田式航路標識用フイが海上保安庁に採用
1973		益田善雄
		第一次石油危機
	英国	
	ソルターダック SEA式クラム プリストルシリンダー ベルファスト式OWC ピッカーズ式OWC NEL式OWC ランカスターたわみ式波力吸収装置	
1978		科学技術庁 海洋科学技術センター 波力発電船『海明』により、浮体式OWC-空気タービン方式の実海域試験
1981		室蘭工業大学と日立造船㈱ 振り子式波力発電実験プラントを設置、実証実験
1983		新技術開発事業団 沿岸固定式波力発電システム『三瀬』の実証試験
1984	ノルウェー Toftestallen	日本造船振興財団 『海陽』ソルターダック-油圧シリンダ方式の開発
1985		海洋環境技術研究所 第2期『海明』の実海域試験
1986	ノルウェー	大成建設 波力利用熱回収システム
1987		エンジニアリング振興協会 消波工定圧化タンク方式波力発電 (ヒラメ養殖用のポンプを回している)
1988		運輸省 波力発電ケーソンによる沖合固定式
1989	スコットランドのIslay島	
1990	中華人民共和国の広州	
1990	インドのVizhinjam港	
1997		
1998	ポルトガルのPico島	
1999	スコットランドのOrkney Pelamis	
2000	デンマークのNissum Bredning Wave Dragon	
	スコットランドのIslay島 商業用沿岸固定式波力発電装置 (LIMPET) の実証運転	
2001	オランダ Archimedes Wave Swing	神戸大学 ジャイロを利用した波力発電装置の開発
		水弁集約方式波力発電システムの実証試験 『マイティイーホーエール』 空気タービンにより生成・貯蔵された圧縮空気を、海域浄化に利用するシステムの実証試験

波エネルギー利用技術の歴史は古く、18世紀後半にフランス人のジラルドによって特許申請されたのを皮切りに現在までに数多くの技術が現れては消えていった。実用化されたものとしての代表としては、1965年に益田善雄氏が開発された益田式航路標識用ブイがある。これは海上保安庁に採用され、現在では全国1400基余りの灯標識の35%以上に用いられ、海外でも500基以上が使用されている。これらのほとんどが最大出力30W～60Wの小型のものであるが、最近では出力1kW程度の波力ブイも10基程度使用されている<sup>9)</sup>。

ここで波力エネルギー変換の方式の分類を示す。波エネルギー技術は次の4種類に大別される。

#### 2) 振動水柱型 (Oscillating Water Column Type)

振動水柱型は、図-1.8に示すような、空気室を持ち、波により空気室内に水面変動と圧力変動をつくって空気室内外の圧力差によりタービンを回して発電する方式である。この方式は可動部を持たないため構造強度上の問題は少ないが、コストパフォーマンスの低さが実用化の障害になっている。

#### 3) 可動物体型 (Movable Body Type)

可動物体型は、図-1.9に示すように、水面近くに置かれた物体が波の作用により運動することを動力して取り込む方式である。これは工夫次第では低コストが可能であるが、従来型は構造強度上の問題が指摘されている。このため、この方式は永らく注目されなかったが、欧州の各国は最近になって、可動物体型の開発に注力するようになった。

#### 4) 越波型 (Overtopping Type)

越波型は波を収斂堤で越波させて海面より高い貯水槽に貯水し、その位置エネルギーを利用するものである。この方式は、収斂堤や貯水槽の建設に多額の費用を要する割にはエネルギー利得が小さいという問題がある。図-1.10は、最近デンマークで開発され注目を浴びている台船型方式のWave Dragon<sup>13)</sup>である。

#### 5) 受圧面型

受圧面型は波エネルギーを直接圧力と流れの形で受け止めるものである。一般的に没水型であるので、異常波浪に対して安全であるが、被圧下での防水機構が必要なため、保守管理やコストの問題がある。最近、英国のスコットランド、エジンバラで開発されたオイスター (Oyster) が注目を浴びている。これは図-1.11に示すように、高圧水を陸上の水カタービンへ汲み上げることで発電する装置である<sup>14)</sup>。20機のオイスターを稼働させれば、3ベッドルームをもつ家庭9,000軒分の電力を賄えるという。オイスターは、水深10～16メートルの沿岸における波エネルギーを利用するための装置であり、最低限の可動部品だけを備え、電気部品はすべて陸上に配備されている。したがって、耐久性のある頑丈な構造物になっていると期待されている。

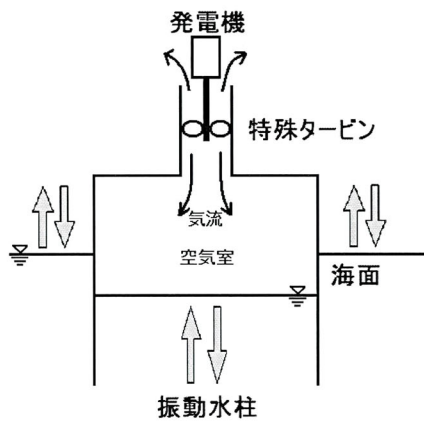


図-1.8 振動水柱型波力発電装置の概略図

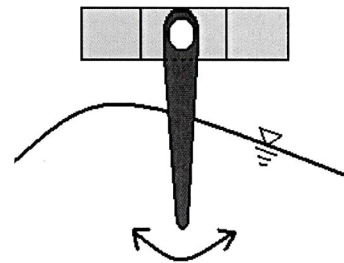


図-1.9 可動物体型波力発電装置の概略図

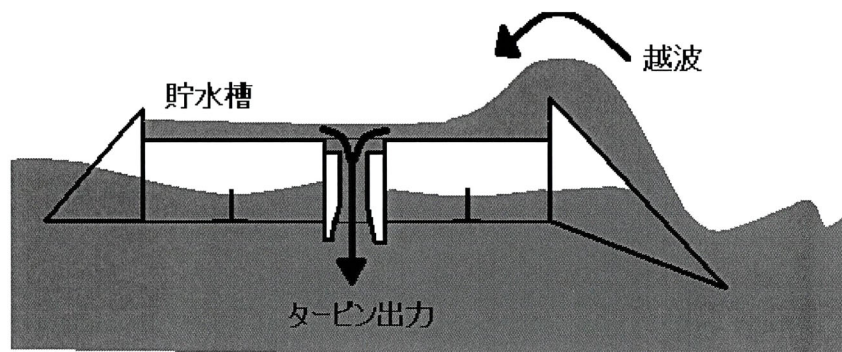


図-1.10 Wave Dragon<sup>13)</sup>の概略図

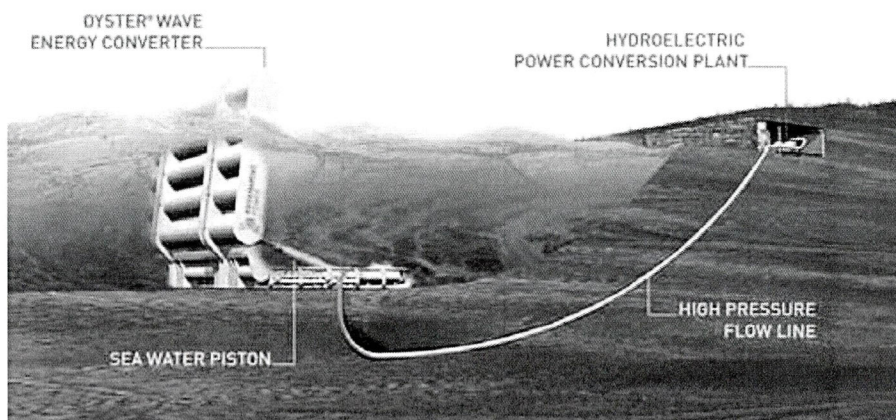


図-1.11 オイスター (Oyster) の模式図<sup>14)</sup>

表-1.1 から分かるように、以前は振動水柱型が波力発電の花形であったが、最近の動向として、上述したスコットランドのオイスター (Oyster) やデンマークの Wave Dragon など様々な方式が開発されている。特に、可動物体型の開発が現在主流になりつつあると思われる。そこでこれまで、日本および世界の機関・企業で開発されてきた可動物体型波力エネルギー変換装置について、装置の原理、利害得失を紹介する。

## (2) 種々の可動物体型波力エネルギー変換技術

### a) 振り子式<sup>15)</sup>

振り子式は、図-1.12に示すように、波上側を開口としたケーソンの上部に支点（線）をもつ受圧板を吊り下げ、ケーソン後壁での波の反射によりケーソン内水室に生じる重複波を利用する。受圧板の位置を重複波の節に位置にし、水平流の動力を利用する。受圧板の運動を動力として取り込み、これを油圧ポンプに伝達し、高压油の一方向の流れとして、油圧モーターを駆動させる仕組みである。この方式は、北海道の室蘭工業大学によって研究・開発され、現在は佐賀大学海洋エネルギーセンターによって研究されている。

このシステムの長所として、装置全体のエネルギー変換効率が40～60%と高い水準である。また、入射・反射時の振り子の運動を2系統のラインで高压油を輸送することから、油圧モーターは2基設置されており、それぞれのトルクは周期的に変動するが、合計トルクは相互補完作用によって一定となり、発電出力は平滑化される利点がある。

しかしながら、台風などの荒波浪時には、設計波パワーの約10～20倍もの波パワーが振り子に作用すると言われ、装置が破損する危険性が非常に高いことが欠点である。

### b) 連結浮体運動式<sup>9)</sup>

連結浮体運動式は、図-1.13に示すように、複数の浮体とそれらの浮体を連結するヒンジによって構成される。原理はこのヒンジの伸縮から動力を獲得するもので、エネルギー変換効率は高いとみられるが、波峰線の向きと連結部の回転軸の向きが一致しないと連結部に捻り力が発生し、破壊の恐れがあり、この装置は構造強度に致命的な欠陥がある。

### c) 連成運動式<sup>9)</sup>

連成運動式は、図-1.14に示すような構造であり、浮体の揺動からリンク機構と滑車・ワイヤを用いて動力変換する。上述の振り子式や連結浮体運動式と同様、エネルギー変換効率は高いと考えられるが、浮体が波の進行方向に平行に運動するように設置されることが必要であり、その制約条件が厳しいため、実用化は難しい。この制約条件をつけない場合、この装置は連結浮体運動と同様、構造強度に致命的な欠陥をもつ。

### d) ソルターダック式<sup>9)</sup>

ソルターダック式は、図-1.15に示すように、アヒルの胴体から尾の部分に似た非円筒物体

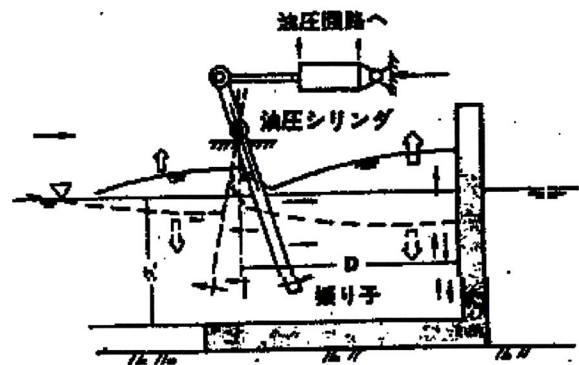


図-1.12 振り子式波力発電装置<sup>9)</sup>の模式図

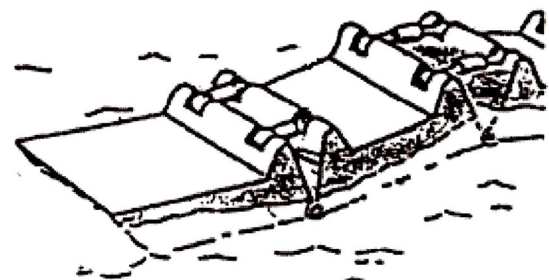


図-1.13 連結浮体運動型波力発電装置<sup>9)</sup>の模式図

が水面上下動により微小角の反転を繰り返し、これにより浮力変化による動力を獲得し、伝達する仕組みである。装置全体のエネルギー変換効率は一次変換効率で約80%をと見積もられている。これは世界初の可動物体型波力発電装置ともいわれ、Salter博士の研究が1974年のNatureに掲載されている<sup>16)</sup>。その前年は世界的オイルショックが起きており、これを機に英国のスコットランドで積極的に開発されるようになった。

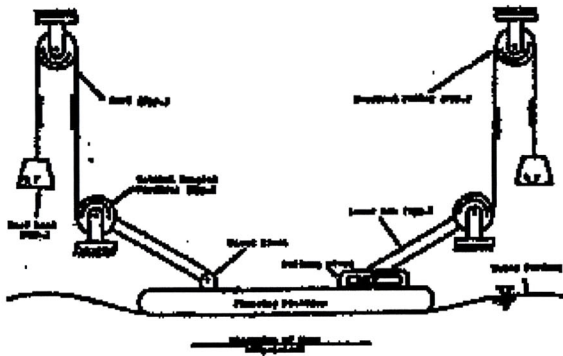


図-1.14 連成運動式波力発電装置<sup>9)</sup>の模式図

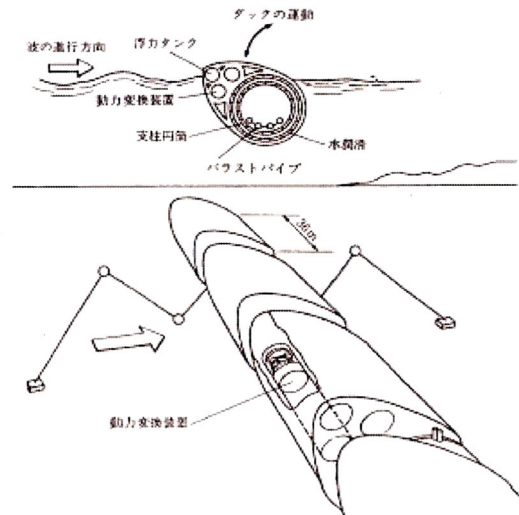


図-1.15 ソルターダック波力発電装置<sup>9)</sup>の模式図

日本でこのシステムを利用して開発されたのが、図-1.16の「海陽」<sup>17)</sup>である。これは海洋政策研究財団(旧日本造船振興財団)によって、1984年8月に沖縄県八重山郡竹富町西表船浮サバ崎沖で海上実験が行われた。このソルターダック型浮体をリンク機構で海洋固定構造物上のアクチュエータに伝達し、油圧に変換し油圧モーターを経て交流発電機を駆動させる仕組みである。長所としては、荒波浪時に構造物全体がジャッキアップすることで対策をとっている。



図-1.16 「海陽」波力発電装置<sup>18)</sup>の外観

しかしながら、リンク機構など、構造強度上の問題を一掃するまでに達していない。

#### e) Aqua Buoy<sup>19)</sup>

Aqua Buoyは、カナダのAquaBuoy Finavera Renewables社によって開発されている。装置は図-1.17と図-1.18に示すようなもので、水中の筒体中に配置されたピストンの運動によって、ホースポンプを駆動し、水面上のブイ内に水流を起こし、タービンを回して発電する仕組みである。ブイは、直径6m、喫水深30m、設置水深50mであり、沖合に設置する。設置費用は、約3億3000万円といわれ、かなりコスト高である。これは、個々の波に対して調整して駆動するシステムを搭載しているからであるが、この調整機能のシステムの搭載がエネルギー変換効率をも低下させる要因にもなっており、実用化への大きな課題といえる。



図-1.17 Aqua Buoy<sup>19)</sup>の外観



図-1.18 Aqua Buoy<sup>19)</sup>の模式図

f) Power Buoy<sup>20)</sup>

Power Buoy は、アメリカの Ocean Power Technologies 社によって開発されている。装置は図-1.19 と図-1.20 に示すように、浮体、円材、上下する円形板、海中変電装置、海岸ケーブルから構成されている。緩く係留されたブイ構造体であり、波の上下運動を利用し、海岸から約 3~5km 沖合に設置される。動力変換で得られた機械エネルギーは、装置内に内蔵されている発電機や電子制御システムにより、電気エネルギーに変換される。

用途としては、海洋警備用ブイ、海洋・レーダー観測、沿岸養殖漁業、海底センシング等の供給電源として想定されている。

また海中変電装置により、最大 10 基の装置と接続可能で、1 本の海底ケーブルを介して各種データを陸地まで送信する構想である。すでに商用モデルの装置仕様を公開しているが、高さ 44m、喫水深 35m、平均フロート直径 11m であり、建造コスト自体は小さくない。建造コストに見合うエネルギー利得があり、低コストのメンテナンス方策が確立すれば、実用化が可能と考えられる。

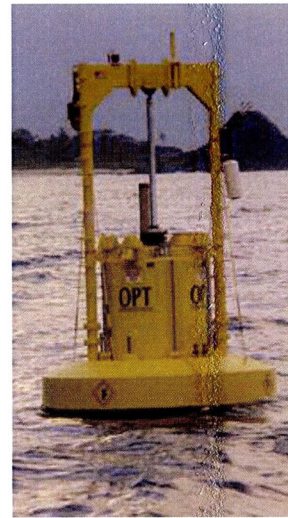


図-1.19 Power Buoy<sup>20)</sup>の外観

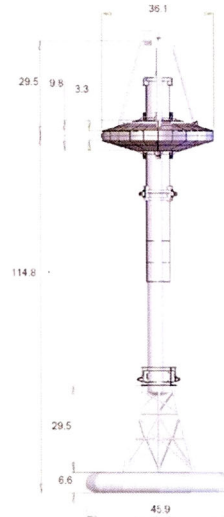


図-1.20 Power Buoy<sup>20)</sup>の模式図 (単位 : feet)

g) Pelamis<sup>21)</sup>

Pelamis は、図-1.21 のように、3つのヒンジ機能をもつ短円筒により連結された4つの長円筒状浮体からなる。これらの長円筒状浮体は進行波の波面により相対運動し、3つの短円筒に内蔵されたヒンジは、この相対運動をシリンダーポンプによって油圧エネルギーに変換し、デジタル制御された水力変換システムより発電する仕組みである。全体の構造は屈曲自在の細長い形状であるため、荒波浪時の高波は適当に浮体を乗り越え、過大浮力による装置の破損を回避できる。ヒンジ支点に反力が作用するが、これに対してヒンジ部の耐久性は疑問であり、また装置稼働中は人が接近することができず、保守・点検ができないという問題が指摘している。

されて

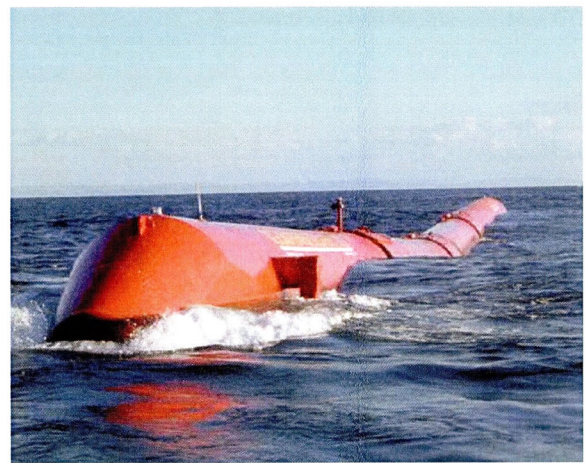


図-1.21 Pelamis<sup>21)</sup>の外観

また、円筒は直径 3.5m、全長 150m で総重量は 700t あり、建造コストだけで約 2 億円～4 億円近くになると試算されている。このコストに見合う電力供給でき、かつ耐久性が確保されれば、実用化は可能であると考えられる。現状では相次ぐ故障により海上実験が何度も中止されている。

h) Wave Star<sup>22)</sup>

Wave Star は、平行に設置された1対の長軸駆動機能の各々から両外側に向けて複数のフロートを2本の棒状体を用いた曲げ抵抗部材を用いて配設した構造をもつ。図-1.22のように、2本の長軸駆動機能から複数の曲がり梁を両サイドに出し、各々の曲がり梁の先端に円筒フロ

ート（直径 5m）を略鉛直に直結している。各フロート内に油圧シリンダーが配置され、長軸駆動機構内の油圧ピストンを介してフロート内の圧力が上昇する。その圧力を利用して発電機に接続された油圧モーターを駆動し発電する仕組みになっている。荒波浪時対策として、フロートが自動的に水面上 20m の高さまで上昇し、稼働を停止する保護モードに切り替える機能を持っている。しかしながら、すべてのフロートに油圧変換機が必要となり、機械関係が占めるコストは高くなる。また、各フロートの上下運動を 1 本の長軸駆動機構に伝達させるためには、各フロート内にワンウェイクラッチを備える必要があり、耐久性の問題が指摘されている。

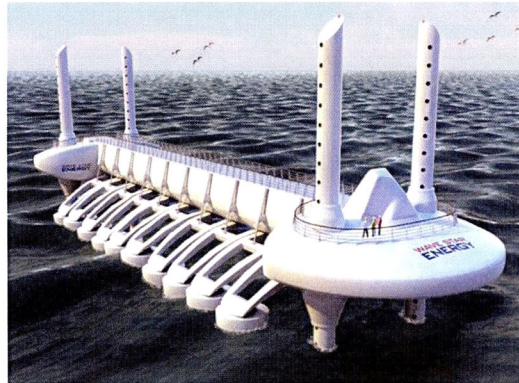
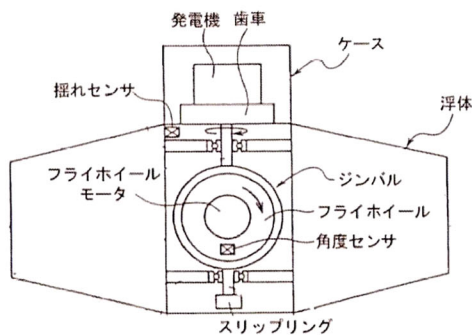


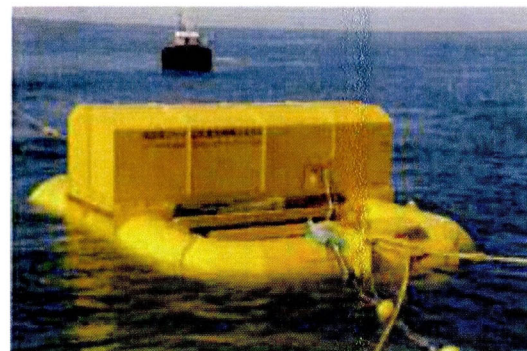
図-1.22 Wave Star<sup>22)</sup>の外観

i) ジャイロ式<sup>23)</sup>

ジャイロ式は、神戸大学によって 2001 年から開発されている。その仕組みは図-1.23 に示すように、波で海面が傾斜を繰り返し、それにより浮体が pitching 運動することを利用する。これによりジンバルという回転台を回し、発電する。2009 年 11 月 20 日、和歌山県すさみ町周参見の海上で、波力発電システムの実用化に向けた試験が再開され、翌 2010 年 2 月まで行われた。試験するシステムは、ベンチャー企業「ジャイロダイナミクス」が普及を目指しており、装置寸法は、縦 9m、横 15m、高さ 3.3m、重量 27t である。将来的に最大発電能力を現在の 2 倍の 90kW を目標に設定しているが、装置が小型ながら効率良くエネルギーを得られるほか、建設や維持管理の費用が安く、耐久性があるということで期待されているが、1m 程度の波高が必要である。



a) 構造図



b) 外観図

図-1.23 ジャイロ式<sup>23)</sup>の構造図と外観図



以上で述べたように、世界中の主要国で波エネルギー利用の技術開発が活発に行われている。しかしながら、いずれも耐久性、設置・維持補修容易化、経済性を両立するまでには至らず、研究段階に留まっている。

### (3) 新しい提案

山口大学では、耐久性、設置・維持補修容易性、経済性の条件を高いレベルで満足する方式として、浮体-釣合錘式波力エネルギー変換装置<sup>24)</sup>を提案し、技術開発している。この稼働形態の概念図を図-1.24に、そして動力変換部の設計図を図-1.25に示す。この方式は水面上に配置されたプーリ、プーリに巻きかけたワイヤ、ワイヤの両端に連結した浮体（フロート）と釣合錘（カウンタウェイト）、ラチェット機構などから構成され、フロート重量とワイヤ張力を介して水面上下動の動力を一方方向に回転する回転軸の運動の動力に変換する。

この方式は、柔構造であるワイヤの使用により浮体が複雑な波の運動に柔軟に追従するため、可動物体型の最大の課題であった構造強度の問題の主要部分を解決している<sup>25)</sup>。また、エネルギーを取り込む可動物体（フロート）と動力を変換・伝達する機械部分とを上下に構造的に分離し、設置や維持補修を従来方式に比べて各段に容易にしている<sup>25)</sup>。

また、ワイヤの使用により重量物を浮体と釣合錘というエネルギー抽出に必要最低限のものにしてあるため、装置稼働において、エネルギーが装置部品の運動エネルギーにとられる部分が小さく、エネルギー利得でも有利である。さらに、この方式は浮体-釣合錘の組からなる装置を複数連結して1つの発電機に出力することができる。また、力学理論が比較的単純で装置諸元と波浪条件（周期、波高）から発生電力を見積もることができる点も大きな特徴である。

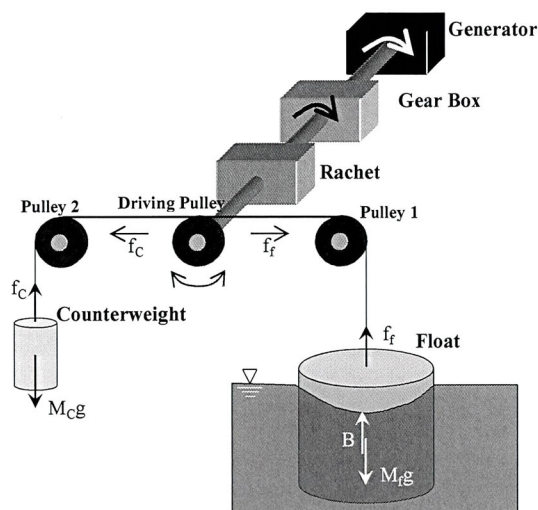


図-1.24 浮体-釣合錘式波力発電変換装置の稼働形態の概念図

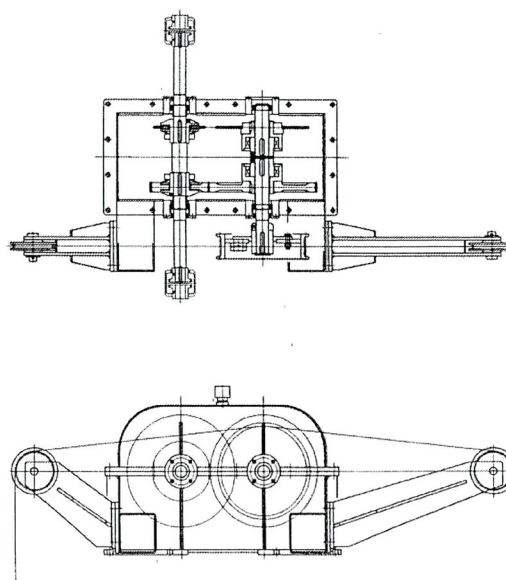


図-1.25 浮体-釣合錘式波力発電変換装置の動力変換部の設計図<sup>26)</sup>

### (4) 本研究の内容

本研究では、山口大学で開発中の浮体-釣合錘式波力エネルギー変換装置の設計のための資料を得るため、その力学検討を行う。浮体-釣合錘式波力エネルギー変換装置では、波が直接浮体に作用す

る形態は好ましくないため、防波堤前面や大型浮体の外周部に略鉛直な壁をたてて遊水室を構成し、遊水室内での水の上下運動をつくり、浮体をその場に配置して稼動することを想定している。このため、主研究では浮体が上下運動する場合を取り扱う。本章に続く第2章では、本装置の力学モデルを構築し、室内実験水槽によるモデルの検証を行う。さらに実海域を想定して、装置諸元を大きくした場合の力学計算を行っている。第3章では、高出力装置の設計の基本を抑えるため、共振の基本問題を検討している。本装置の共振特性解析<sup>27)</sup>の基礎式を導出し、共振問題の基本的性質を調べている。第4章では、実機を想定して共振問題を検討している。海域の卓越周期に装置の固有周期に合致させる諸元を求める方法を検討している。第5章では、バネ・テンションプーリを用いて波の1サイクル間の発生電力とワイヤ張力の変動を平滑化して、装置の安全性と経済性を向上させる技術<sup>28)</sup>を予備的に検討している。第6章では、遊水室内の水の運動について予備的な検討<sup>29)</sup>を行っている。

## 参考文献

- 1) NREL (National Renewable Energy Laboratory)HP: [http://www.nrel.gov/learning/re\\_basics.html](http://www.nrel.gov/learning/re_basics.html)
- 2) NEF 財団法人新エネルギー財団 : <http://www.nef.or.jp/what/whats00.html>
- 3) 近藤康夫：地球温暖化に配慮した新電力エネルギー読本，創風社出版 2008.
- 4) フリー百科事典『ウィキペディア (Wikipedia)』HP :  
<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%82%A1%E3%82%A4%E3%83%AB:SolarCellProduction-J.PNG>
- 5) フリー百科事典『ウィキペディア (Wikipedia)』HP :  
[http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%82%A1%E3%82%A4%E3%83%AB:Solar\\_two.jpg](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%82%A1%E3%82%A4%E3%83%AB:Solar_two.jpg)
- 6) 清水幸丸編著：地球環境の再生をめざして 自然エネルギー利用学（改訂版），パワー社，pp.107-142 1999.
- 7) NEDO 海外レポート 819 号 : <http://www.nedo.go.jp/kankobutsu/report/819/819-1.html>
- 8) NEDO 技術開発機構 HP : [http://www.nedo.go.jp/nedohokkaido/kitanodaichi/siry/siry03\\_1.html](http://www.nedo.go.jp/nedohokkaido/kitanodaichi/siry/siry03_1.html)
- 9) 清水幸丸編著：地球環境の再生をめざして 自然エネルギー利用学（改訂版），パワー社，pp.161-194, 1999.
- 10) Gerald L. Wick and Walter R. Schmitt: Harvesting ocean energy, The Unesco Press, 1981.
- 11) R.Tronkivist: Oceanology, International'78, Programme arranged by the watt Committee on Energy, 1978.
- 12) 田端竹千穂・柳生忠彦・福田功：日本沿岸における波のエネルギー，港湾技研資料，No.364, 1980, 20p.
- 13) Wave Dragon HP : <http://www.wavedragon.net/>
- 14) 日刊温暖化新聞（2009年12月8日記事）HP : [http://daily-ondanka.com/news/2009/20091208\\_1.html](http://daily-ondanka.com/news/2009/20091208_1.html)
- 15) 渡部富治:実用化に向かう波力発電（面白くなる海のエネルギー），パワー社，pp.23-90, 2009.
- 16) Salter, S.H.: Wave Power, *Nature*, Vol.249, No.5459, 1974.
- 17) 近藤一郎：海洋エネルギー利用技術，森北出版，pp.43-91, 1996.
- 18) 廣瀬学：波力発電の現状，HP : <http://www.glocom.ac.jp/eco/esena/resource/hirose/>
- 19) AquaBuoy Finavera Renewables Ltd.HP:<http://www.finavera.com/>
- 20) Ocean Power Technologies Ltd.HP:<http://www.oceanpowertechnologies.com/>

- 21) Pelamis Wave Power Ltd.HP:<http://www.pelamiswave.com/>
- 22) Wave Star Energy Ltd.HP:<http://www.wavestarenergy.com/>
- 23) 神吉博：高効率ジャイロ波力システムの開発，山口大学建設部会技術講演会，2008.
- 24) 羽田野袈裟義，種浦圭輔，渡邊誠，中野公彦，斉藤俊，松浦正己：浮体式波力エネルギー変換の力学，土木学会論文集 B，Vol.62, No.3, pp.270-283, 2006.
- 25) Kesayoshi Hadano, Kimihiko Nakano, Keisuke Taneura, Kyo Ohgi, Pallav Koirala: On the occurred eclectic power of the float-type wave generation device, Proceeding Techno-Ocean 2002, pp. 4-7. CD ROM.2002.
- 26) 中田博美：回転変換機設計図
- 27) 種浦圭輔，羽田野袈裟義，米山治男，池上国広，中野公彦，Pallav KOIRALA：可動物体型波力発電装置の共振特性の検討，土木学会論文集 B，Vol.66, No.2, pp.196-206.2010.
- 28) 種浦圭輔，羽田野袈裟義，Pallav KOIRALA，松岡克弥：蓄力機能を有した弾性体を導入したつるべ式波力エネルギー変換装置の力学モデル，海洋開発論文集，Vol.24, pp.111-115. 2008.
- 29) 平石直也，種浦圭輔，朝位孝二，Pallav Koirala，羽田野袈裟義：浮体式波力発電用遊水室内の反射率とその内部の水面変動評価，土木学会第 62 回中国支部研究発表会概要集，CD-ROM, 2010.

## 第2章 浮体-釣合錘式波力エネルギー変換装置の力学モデル

本章では、前章で提案した『浮体-釣合錘式波力エネルギー変換装置』<sup>1)</sup>の設計のための基礎資料を得ることを目的として、基本構成の力学モデルを構築し、室内実験によりモデルを検証する。また、実海域での稼動を想定し、数値的検討を行う。

浮体-釣合錘式波力発電は、前章で紹介したように、可動物体型波力発電に属し、特に浮体の上下運動（浮体の重量）を利用するものである。これは、プーリ・ワイヤ・浮体・釣合錘・ラチェット機構から構成されており、前章で述べたように、この方式は、柔構造であるワイヤの使用により可動物体型の最大の課題であった構造強度の問題の主要部分を解決している。また、エネルギーを取り込む可動物体（浮体）と動力を変換・伝達する機械部分とを構造的に分離し、設置や維持補修を従来方式に比べて各段に容易にしている。また、浮体や釣合錘など機械部分以外は鋼材くずなど再生物を利用可能であるので、大幅なコストダウンが期待できる。したがって、既往の可動物体型波力発電装置に比べ、耐久性に優れ、しかも低コストで製作であるという特徴がある<sup>2)</sup>。

ここでは、電力計算まで行う力学モデルを構築し、そのモデルの検証を行い、発生電力等の種々の物理量を計算する。これにより、本システムを電力源として利用する時の装置諸元を考えることができる。

### 2.1 力学モデルの構築

本システムの模式図を図2.1に示す。力学モデルは、発電機関連の力学、無負荷・静止状態での浮体・釣合錘の釣合式、発電機稼動状態における浮体および釣合錘の運動方程式、回転体の運動方程式により構成される。力学モデル構築では、浮体・流体間の相互作用の評価として、浮体に作用する付加質量力、流体粘性による抵抗力を考慮する方法がある<sup>1),2)</sup>。付加質量係数や流体抵抗力の係数に関して、円柱まわりの振動流などの問題について詳細な検討が加えられ、これらがレイノルズ数やクーリガン・カーペンター数(KC数)の関数になることが明らかにされている<sup>5)</sup>。しかしながら、これらは水面の影響がない状態にある長い柱状体を対象とした研究で、本研究で必要となる水面近くにある短い柱状体の問題に適用するには難がある。

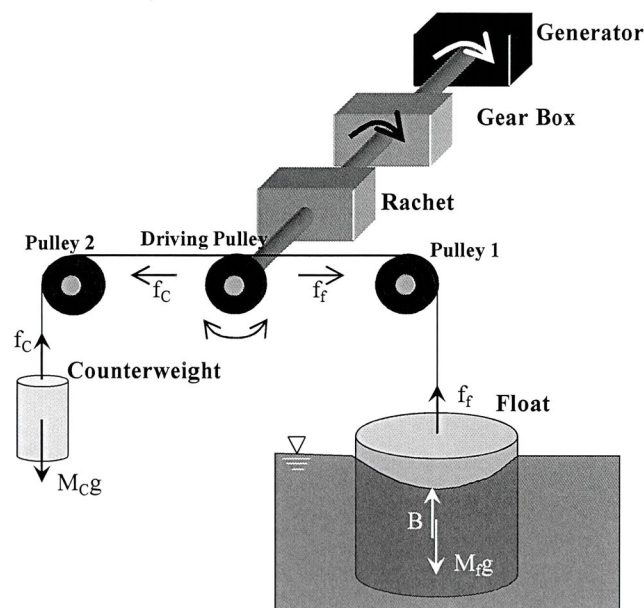


図2.1 浮体-釣合錘式波力発電装置の模式図

もう1つの方法として、付加質量力、造波減衰力そして波強制力として浮体・流体間の相互作用力を評価する方法がある<sup>3)</sup>。

本章では、浮体・流体間の相互作用力を付加質量力と流体抵抗による評価するモデルを第1モデル、付加質量力と造波減衰力そして波強制力により評価するモデルを第2モデルとし、両方のモデルにより検討する。但し、簡単のため第2モデルは線形問題のみを取り扱う。

### (1) 第1モデル<sup>1)</sup>

第1モデルの構成は次のようである。

#### a) 無負荷・静止状態での浮体と釣合錘の釣り合い

図2.1のように、浮体直径を $D_f$ 、浮体と釣合錘の質量をそれぞれ $M_f$ と $M_c$ 、この状態の浮体の喫水深を $h$ とおくと、次の関係式が成り立つ。

$$M_c g + \frac{1}{4} \pi D_f^2 \rho_w h g = M_f g \quad (1)$$

ここで、 $\rho_w$  は海水の密度、 $g$  は重力加速度である。

#### b) 稼働状態での浮体の運動方程式

浮体の高さを $H_f$ 、無負荷・静止状態からの浮体と水面の上昇量をそれぞれ $x_f$ と $x_w$ 、浮体をつるしたワイヤの張力を $f_f$ とすると、浮体上下動の運動方程式は式(2)で与えられる。

$$M_f \frac{d^2 x_f}{dt^2} = f_f + \frac{1}{4} \pi D_f^2 \rho_w (h + x_w - x_f) g - M_f g \\ + \frac{1}{8} C_D \rho_w \left| \frac{dx_w}{dt} - \frac{dx_f}{dt} \right| \left( \frac{dx_w}{dt} - \frac{dx_f}{dt} \right) \pi D_f^2 - \frac{1}{4} C_M D_f^2 \rho_w (h + x_w - x_f) \frac{d^2 x_f}{dt^2} \quad (2)$$

ここで、 $C_D$ と $C_M$ はそれぞれ抵抗係数と慣性抵抗係数である。なお、場合によっては浮体が宙吊り状態や全没水状態になるが、装置稼働状態としては浮体が一部没水を維持する状態が望ましくその状態での稼働を想定しているので、ここではこの場合についてのみ取り扱うことにし、この場合の式のみを示す。

#### c) 稼働状態での浮体の運動方程式

釣合錘をつるしたワイヤの張力 $f_c$ は釣合錘上昇の加速度を考慮すると次式で与えられる。

$$f_c = M_c \left( g + \frac{d^2 x_c}{dt^2} \right) \quad (3)$$

ここで $x_c$ は釣合錘の無負荷・静止時からの上昇量である。

#### d) 回転体の運動方程式

回転体の運動方程式は、駆動プーリの無負荷・静止状態からの反時計方向の回転角を $\theta$ として次式で表される。

$$I \frac{d^2 \theta}{dt^2} + C' \frac{d\theta}{dt} = \tau + (f_c - f_f) R_m \quad (4)$$

ここで、 $I$ と $C'$ はそれぞれ回転系全体の回転慣性と機械系の摩擦による減衰を、駆動プーリの回転角加速度と回転角速度を用いて表現するための等価な慣性モーメントと減衰係数である。

e) 発電機関連の力学

図 2.1 において、駆動プーリが発電機を時計方向にねじり、その反作用として発電機が駆動プーリを反時計方向にねじるトルクを  $\tau$ 、発電機に発生する電流を  $i$ 、発生電圧を  $e$ 、駆動プーリの反時計方向の回転角を  $\theta$  とすると次の関係式が成り立つ。

$$\tau = -Gk_{\tau}i \quad (5)$$

$$e = Gk_e \frac{d\theta}{dt} \quad (6)$$

ここで、 $G$  はギア比、 $k_{\tau}$  はトルク係数、 $k_e$  は誘導発電係数である。また派生的な関係式として、 $\tau$  は式(7)、そして発生電力  $P_G$  は式(8)により与えられる。

$$\tau = -\frac{G^2}{r} k_{\tau} k_e \frac{d\theta}{dt} \quad (7)$$

$$P_G = r \cdot i^2 = r \left( \frac{-Gk_e}{r} \cdot \frac{d\theta}{dt} \right)^2 \quad (8)$$

ここで、 $r$  は負荷抵抗であり、この抵抗で消費される電力を可能発電量とする。また内部抵抗の影響は無視する。また、浮体の上昇量  $x_f$ 、釣合錘の上昇量  $x_c$  と駆動プーリの回転角  $\theta$  には次の関係がある。

$$x_f = R_m \theta, \quad x_c = -R_m \theta \quad (9)$$

f) 最終的な計算式

式(1)、式(2)、式(3)、式(4)、式(7)そして式(9)を組み合わせワイヤ張力の消去することにより、駆動プーリの回転角  $\theta$  の支配方程式が次のように与えられる。

$$\begin{aligned} & \left( \frac{I}{R_m} + (M_c + M_f)R_m + \frac{\rho_w \pi C_M D_f^2}{4} (h + x_w - R_m \theta) R_m \right) \frac{d^2 \theta}{dt^2} + \frac{1}{R_m} \left( C' + \frac{G^2}{r} k_{\tau} k_e \right) \frac{d\theta}{dt} \\ & + \frac{\rho g \pi}{4} D_f^2 R_m \theta = \frac{\rho g \pi}{4} D_f^2 x_w + \frac{1}{8} C_D \rho_w \pi D_f^2 \left| \frac{dx_w}{dt} - R_m \frac{d\theta}{dt} \right| \left( \frac{dx_w}{dt} - R_m \frac{d\theta}{dt} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

以上より、所定の波と初期条件に対して解き、 $\theta$  の時系列を求めると、時々刻々の  $\dot{\theta}$  と  $\ddot{\theta}$  が得られる。

g) 計算条件

最も基本的な波として正弦波を与え、水面波のある適当なサイクルの水位が最高となる時刻 ( $t=0$ ) までは発電機との連結をクラッチ・オフの状態ですべてが水面波に追従し、 $t=0$  で瞬時にクラッチ・オンの状態になり、発電機が稼動する場合を計算する。この時水面変動は式(11)により、初期条件は式(12)により与えられる。

$$x_w = \frac{H}{2} \cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right) \quad (11)$$

$$\theta(0) = \frac{H}{2R_m}, \quad \dot{\theta}(0) = 0 \quad (12)$$

しかしながら、前述のように水面近くに置かれた短い柱状に作用する流体力の性状は明らかでなく、流体抵抗力の係数  $C_D$  と仮想質量係数  $C_M$  を評価するのは困難である。よって、ここで  
の計算ではこれら  $C_D$ ,  $C_M$  をゼロとして計算する<sup>1), 2), 4)</sup>。

## (2) 第2モデル<sup>3)</sup>

第2の方法として、付加質量力、造波減衰力と波強制力を導入して浮体・流体間の相互作用の評価を行う力学モデルを構築した。つまり、ポテンシャル波理論に基づいて浮体に作用する、作用波力や動的流体力の推定を行い、波浪境界値問題の解法を線形波動論<sup>6)</sup>の範囲内ではあるが、厳密に評価している。ただし、波強制力の評価は水面が静止して浮体が上下動する状況でなければ得られない。このため、水面変動がない場合の浮体の自由振動を考え、その後、波強制力を導入する。また、第1モデルとの相違は、稼働状態の浮体の運動方程式だけで、それ以外は、前項と同様である。このため、ここでは浮体の運動方程式のみ説明する。

### a) 浮体の運動方程式

浮体の運動方程式を考える前に、波強制力の評価に関する前述の事情から、水面変動がない場合の浮体の自由振動を考える。その方程式は式(13)で与えられる。

$$M_f \frac{d^2 x_f}{dt^2} = f_f + \frac{1}{4} \pi D_f^2 \rho_w (h - x_f) g - M_f g \quad (13)$$

なお、場合によっては浮体が宙吊り状態や全没水状態になるが、この装置の稼働としては浮体が一部没水を維持する状態が望ましく、その状態での稼働を想定しているの、前項と同様にこの場合についてのみ式を示す。さらに、無負荷・静止状態での浮体・釣合錘の釣り合い式(式(1))を用いて式(13)を次のように変形する。

$$M_f \frac{d^2 x_f}{dt^2} = f_f - M_c g - \frac{1}{4} \pi D_f^2 \rho_w x_f g \quad (14)$$

次に、規則波の単位振幅当たりの波強制力  $F_w$ 、ラディエーション流体力<sup>6)</sup>を生む付加質量  $M_a$  として造波減衰力  $C dx_f/dt$  を導入して式(14)を変形すると、式(15)が得られる。

$$(M_f + M_a) \frac{d^2 x_f}{dt^2} + C \frac{dx_f}{dt} + \frac{1}{4} \pi D_f^2 \rho_w g x_f + M_c g - f_f = F_w \cdot \frac{H}{2} \quad (15)$$

ここで、 $C$  は造波減衰の係数、 $H$  は入射波の波高である。左辺の第1項は慣性力、第2項は造波減衰力、第3項は静水圧による復元力、第4項は釣合錘重量、第5項はワイヤ張力、そして右辺は波強制力で波による外力である。また  $F_w$  は単位振幅あたりの力である。

### b) 最終的な計算式

式(3)、式(4)、式(7)、式(9)および式(15)を組み合わせると、駆動プーリの回転角  $\theta$  を支配する式が次のように与えられる。

$$\left( \frac{I}{R_m} + (M_f + M_c + M_a) R_m \right) \frac{d^2 \theta}{dt^2} + \frac{1}{R_m} \cdot \left( C \cdot R_m^2 + C' + \frac{G^2}{r} k_r k_e \right) \frac{d\theta}{dt} + \frac{1}{4} \pi D_f^2 \rho_w g R_m \theta = F_w \cdot \frac{H}{2} \quad (16)$$

この組み合わせ式を前項と同様に所定の波と初期条件に対して解き、 $\theta$  の時系列を求めると、時々刻々の  $\dot{\theta}$  と  $\ddot{\theta}$  が得られる。

### c) 計算条件

波強制力は最も基本的な波として正弦波を与え、初期条件は前項と同様、水面波のある適当な

サイクルの水位が最高となる時刻 ( $t=0$ ) までは発電機との連結をクラッチ・オフの状態です浮体が水面波によって運動し、 $t=0$ で瞬時にクラッチ・オンの状態になり、発電機が稼動を開始する場合を計算する。この時波強制力は  $F_w$  は式(17)、初期条件は式(18)により与えられる。

$$F_w = A \cos(\omega t + \phi) \quad (17)$$

$$\theta(0) = \frac{H}{2R_m}, \quad \dot{\theta}(0) = 0 \quad (18)$$

ここで、 $A$ は波強制力の振幅、 $\omega$ は波の角振動数、 $\phi$ は波と波強制力の間の位相差である。波強制力の振幅 $A$ は三次元特異点分布法により求められるが、その説明は次節で述べる。

## 2.2 力学モデルの検証<sup>1), 3)</sup>

両モデルの検証は、大型模型装置を用いて行われた水槽実験の結果により行なう。

### (1) 実験装置と方法

実験は、2005年、三菱重工業(株)長崎研究所の耐航性能試験水槽(平均水深3.2m、幅30m、長さ160m)で行なわれた。実験に用いた水槽を図2.2に示す。実験は、図の多方向造波装置の対岸の消波装置の前方に架台を設置し、架台に模型装置を据えて水槽の中に浮体を浮かべ、波が浮体に直接作用する状態で行われた。図の水色の部分が水を張った部分で、実験は図中水色の右端の波消装置の前方に架台を張り出し、その架台の上に波力エネルギー変換装置を設置して行なわれた。図2.3と図2.4は水槽の架台に波力エネルギー変換装置を据えつけた状態を示す。図2.3の上が平面図で下が側面図である。浮体を支える張り出し部を支柱で支えている。

また海岸施設上に置いた4組の浮体・釣合錘を連結した波力装置の全景を図2.5に示す。装置は浮体・釣合錘を任意の組数とすることができる。水槽実験では2組のモデルを用い、駆動プーリにワイヤを数回巻きかけて図の右手の水面に浮かべた浮体に連結している。4組の駆動プーリに隣接配置したドラム状のものにはラチェット機構と遊星歯車を内蔵し、一本の出力軸に連結されている。この構成により、不揃いに上下動する複数の浮体・釣合錘の組から水面変動の動力を取り出し、協力して出力軸を回すようになっている。これは、ラチェット機構のなせる業である。この装置では、出力軸の回転はどの位置でも同一速度であり、後段に行くほどトルクが加算される仕組みである。また、この構成では水面が上昇する時も下降する時もエネルギー変換する形態が可能である。しかし、水面上昇時と下降時では駆動トルクが異なり、駆動トルクがエネルギー変換に要するトルクに比べて小さいと、ワイヤがたるむ事態がおこり危険である。このため、大重量の浮体を用いて水面が下降するときのみ浮体重量によりエネルギー変換を行なうようにラチェット機構を装着している<sup>7)</sup>。また、連結の最後段の部分でむき出しの歯車を使って増速している。水槽内に発生させる波浪は、造波機的能力の制約から、周期/波高の組み合わせとして、1.8秒/0.32m、2.0秒/0.25m、3.0秒/0.14m、3.5秒/0.24m、4.0秒/0.27m、4.5秒/0.15m、5.0秒/0.10mとした。実験では、水面変位、浮体上下動、ワイヤ張力、トルクなどを測定している。実験で用いた浮体諸元は、表2.1の通りである。その他の装置の諸元として、駆動プーリの半径は0.18m、ギア比41.36である。

表2.1 実験時の装置諸元

半径(m)	高さ(m)	比重	質量(t)	喫水率	喫水(m)	KG(m)	排水重量(kN)	ウェイト重量(kN)
1.00	0.70	0.75	1.640	0.66	0.46	0.35	14.602	1.470
重心			メタセンター高さ		復元力(kN/m)	慣性モーメント		
X(m)	Y(m)	Z(m)	GM-x(m)	GM-y(m)		I <sub>x</sub> (t <sup>4</sup> m <sup>2</sup> )	I <sub>y</sub> (t <sup>4</sup> m <sup>2</sup> )	I <sub>z</sub> (t <sup>4</sup> m <sup>2</sup> )
0	0	-0.113	0.422	0.422	31.56	4.769E-01	4.769E-01	8.199E-01

※KG:浮体底から重心までの距離

※メタセンター高さ:重心位置とメタセンターとの距離



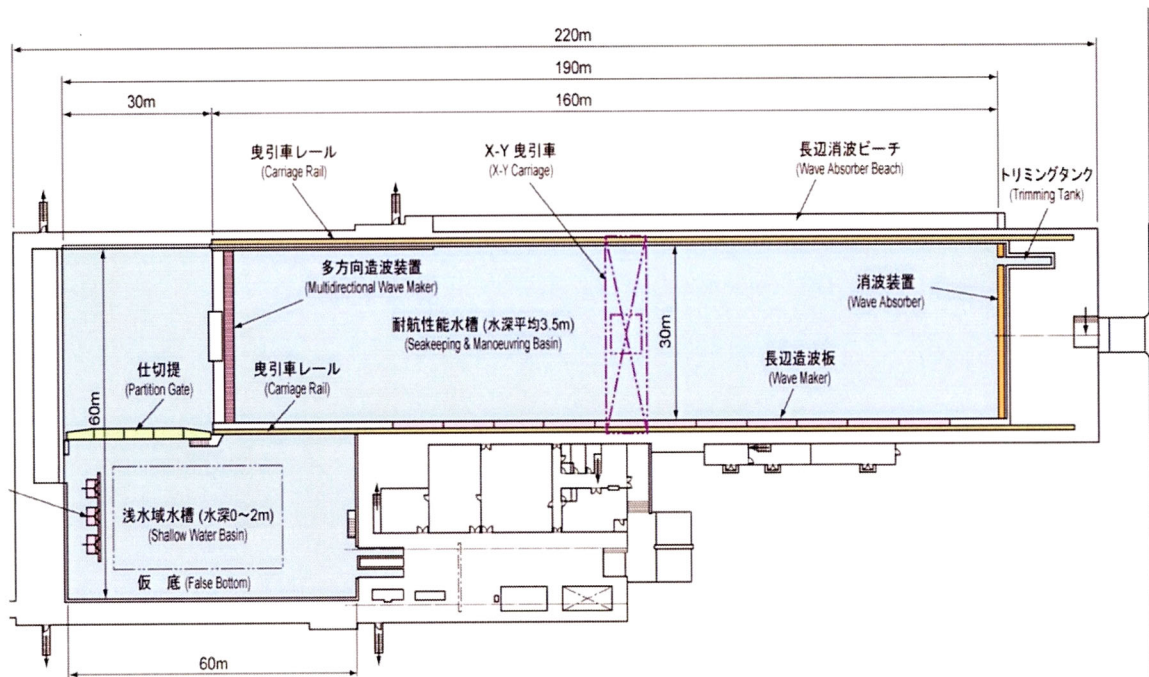


図 2.2 実験に用いた水槽の平面図

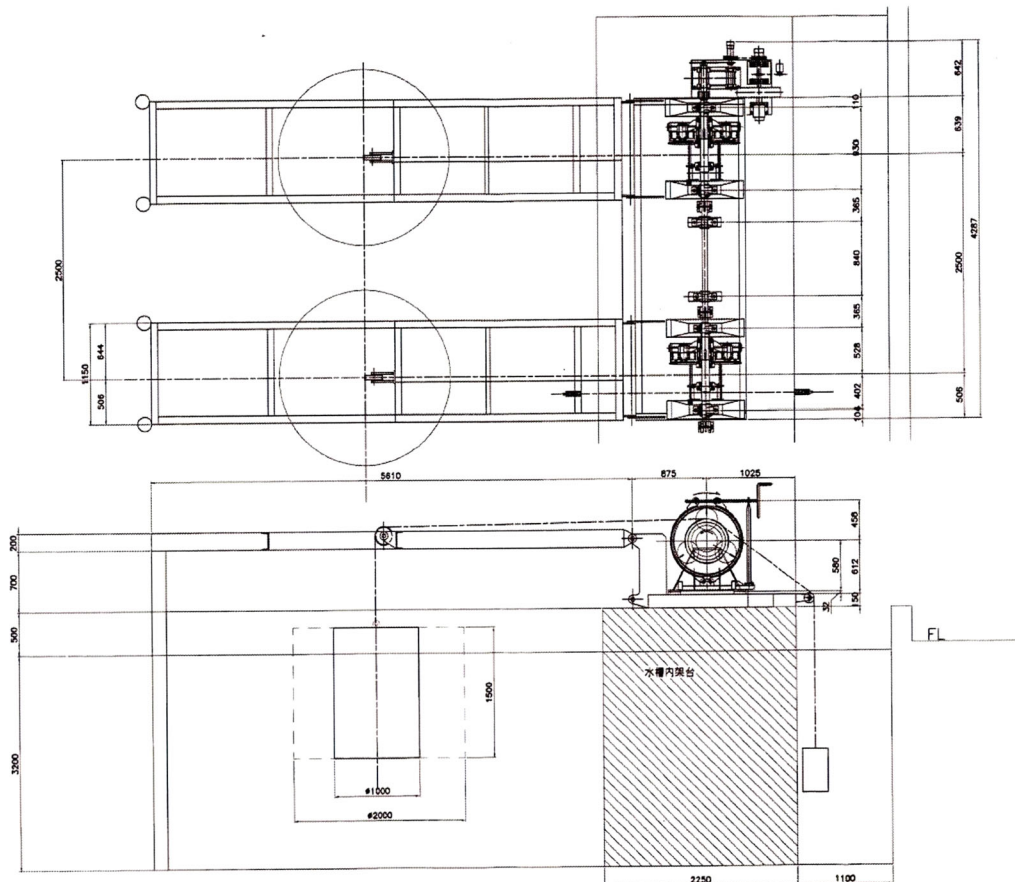


図 2.3 装置を架台に設置した状態の図

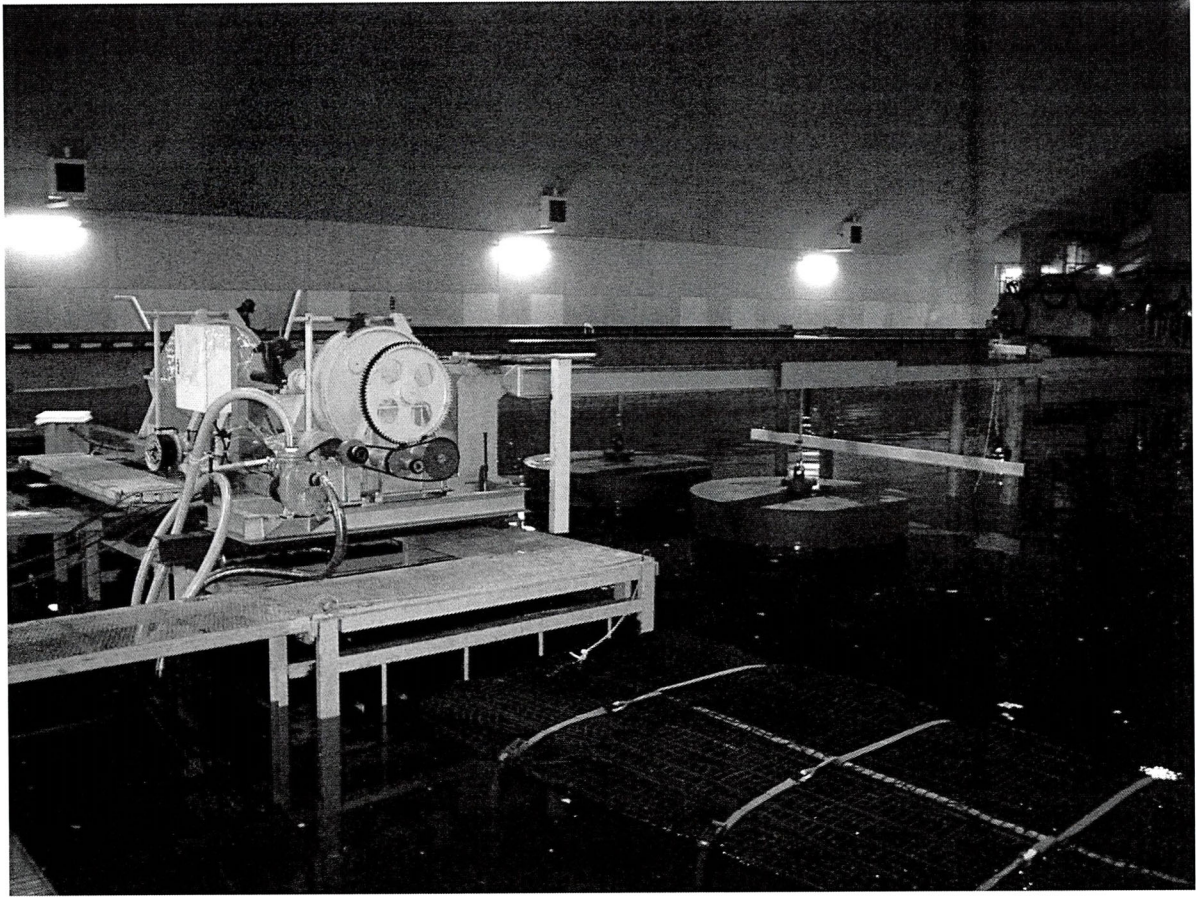


図 2.4 実験時の写真



図 2.5 4組モデルの装置の前景写真

## (2) 実験結果<sup>4)</sup>

実験機の稼働結果を簡単に述べると、周期3秒以下では来襲波により浮体が著しいピッチングを起こし、事実上エネルギー変換ができなかった。有意のエネルギー変換が行われた波浪条件（波周期/波高）は、3.5秒/0.24m、4.0秒/0.27mの条件である。これらの実験で得られた水面変動、浮体上下動（いずれも静止時からの上昇を正）、およびワイヤ張力の時系列を図2.6と図2.7に示す。無負荷・静止時との対比で浮体上昇量が水面上昇量より大きい時間帯にワイヤ張力が生じ、エネルギー変換が行われる。

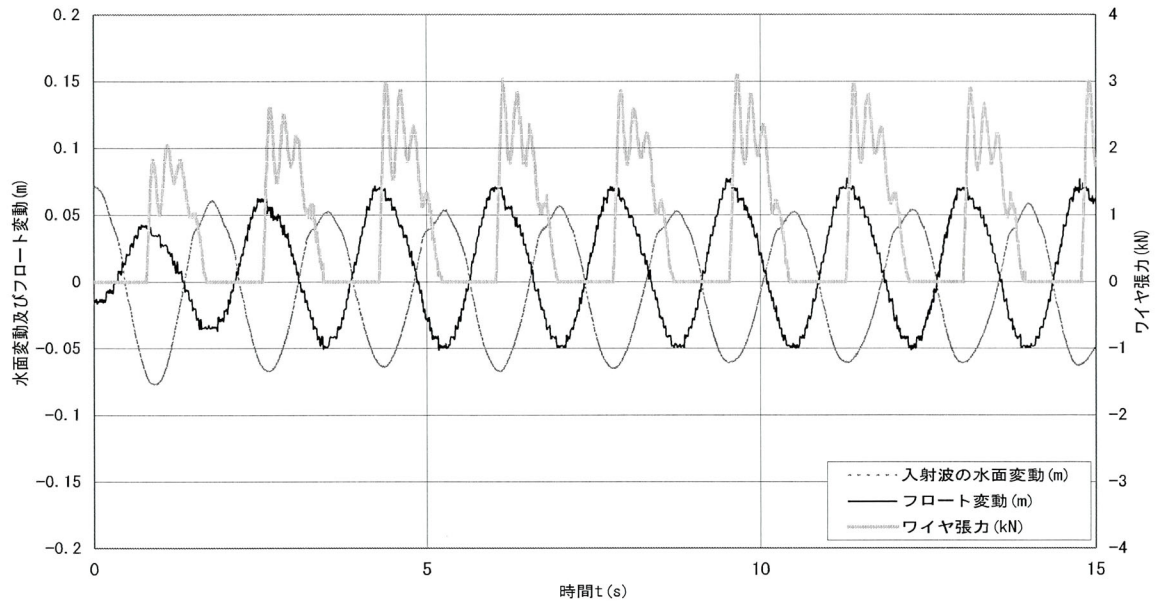


図 2.6 水面変動、浮体変動およびワイヤ張力の時系列変化  
(波周期/波高=3.5秒/0.24mの場合)

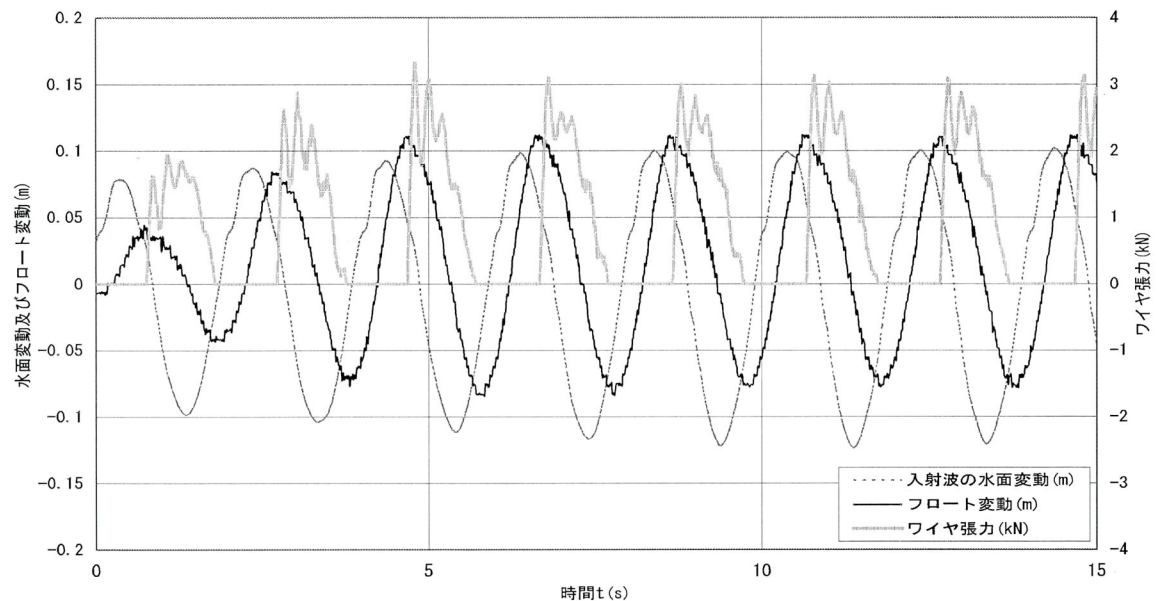


図 2.7 水面変動、浮体変動およびワイヤ張力の時系列変化  
(波周期/波高=4.0秒/0.27mの場合)

### (3) モデルの検証方法

前項に示した波浪条件に対して 2.1 節の 2 つの力学モデルの検証を行う。評価方法は、実験結果からワイヤ張力とワイヤの走行速度（または浮体昇降速度）の積として求めた仕事率の時系列を求め、その時間平均とモデル計算で得られる仕事率の時間平均から機械系の粘性減衰係数を同定した。計算結果はこの同定した機械系の粘性減衰係数  $C'$  を用いたものを示す。

#### a) 第 1 モデル<sup>1)</sup>

第 1 モデルの構成式は前出の式(10)であるが、本装置に適用できる  $C_D$ ,  $C_M$  の値を得るのが困難である。このため、 $C_D=C_M=0$  として計算した。すなわち式(10)の代わりに式(18)を用いた。

$$\left( \frac{I}{R_m} + (M_c + M_f)R_m \right) \frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{1}{R_m} \cdot \left( C' + \frac{G^2}{r} k_\tau k_e \right) \frac{d\theta}{dt} + \frac{\rho g \pi}{4} D_f^2 R_m \theta = \frac{\rho g \pi}{4} D_f^2 x_w \quad (18)$$

式(11)と式(12)の波の条件と初期条件を用いて式(18)を解き、時々刻々の  $\theta$  の値を得る。また、仕事率を求めるには、ワイヤ張力とワイヤの走行速度（または浮体昇降速度）を算出する必要があるが、ワイヤ張力は式(4)を変形して得られる式(19)により計算する。そして、ワイヤ走行速度は式(9)から算出する。

$$f_f = \tau + f_c - \frac{I}{R_m} \frac{d^2\theta}{dt^2} - \frac{C'}{R_m} \frac{d\theta}{dt} \quad (19)$$

以上の方法により仕事率を算出し、機械系の粘性減衰係数  $C'$  を同定した結果を図 2.8 に示す。図より本実験で用いた装置の機械系の粘性減衰係数は仕事率から評価すると 1580(N.m.s) 程度であることが分かる。

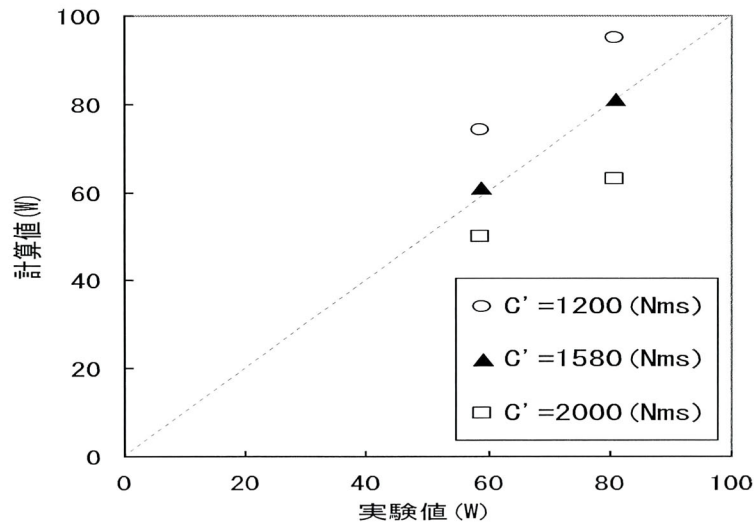


図-2.8 第1モデルの粘性減衰係数  $C'$  の決定

#### b) 第 2 モデル<sup>3)</sup>

モデル計算を行う前に、ラディエーション流体力<sup>6)</sup>を導入した浮体の運動方程式、すなわち式(15)において、各波浪条件に対する付加質量  $Ma$  ( $\text{kN} \cdot \text{s}^2/\text{m}$ )、造波減衰力  $C$  ( $\text{kN} \cdot \text{s}/\text{m}$ ) を算出した。計算に用いた手法は、三次元特異点分布法<sup>8)</sup>であり、周期的湧き出しを浮体表面に分布

させ、グリーン関数を用い、特異点の強さを未知数とした積分方程式を解く方法である。前述の式(17)と式(18)の波の条件と初期条件に対して、式(16)を解くと、時々刻々の $\theta$ の値が得られる。仕事率の算出は前項 a)と同様である。その結果を表 2.2 に示す。

表 2.2 水槽実験の条件での流体力評価

波浪条件			付加質量 $M_a$ (kN s <sup>2</sup> /m)	造波減衰力の係数 $C$ (kN s/m)	波強制力	
					振幅 $A$ (kN /m)	位相差 $\phi$ (rad)
実験番号 1	波高 $H$ (m)	0.27	1.980	1.104	23.246	0.078
	周期 $T$ (s)	4.0				
実験番号 2	波高 $H$ (m)	0.24	1.853	1.252	21.295	0.111
	周期 $T$ (s)	3.5				

これらの値を用いて、仕事率から粘性減衰係数を同定した過程を図-2.9 に示す。図より本実験で用いた装置の機械系の粘性減衰係数は仕事率から評価すると 1406(N.m.s) 程度であることが分かる。

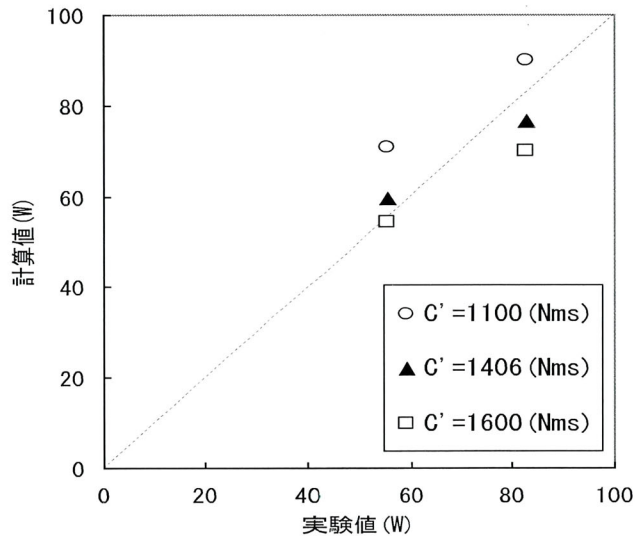
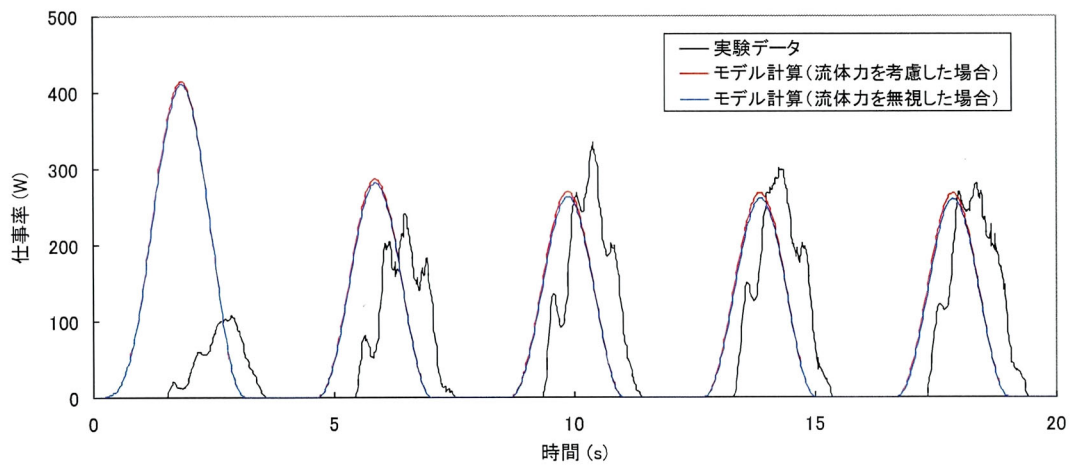


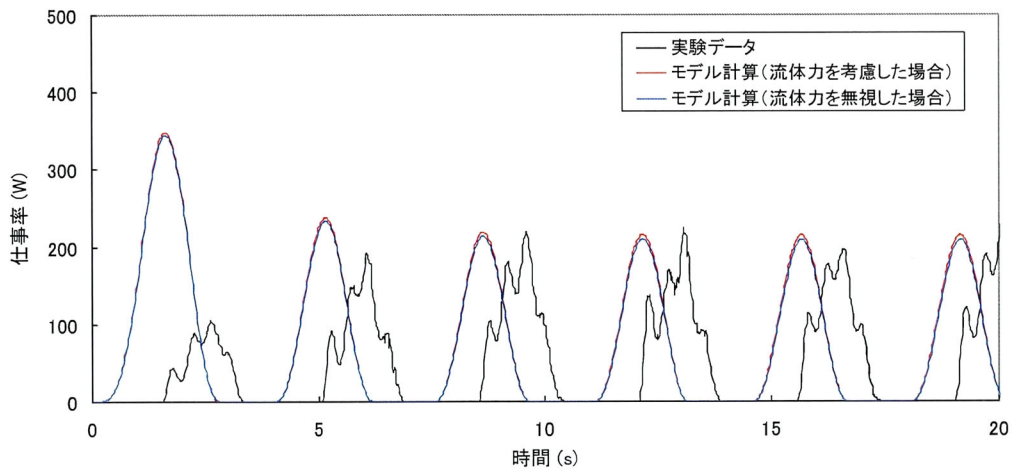
図-2.9 第2モデルの粘性減衰係数 $C'$ の決定

#### (4) モデルの検証

以上のように、第1モデルと第2モデルの両方について、機械系の粘性減衰係数 $C'$ を同定した。ここで、各波浪条件に対する仕事率、浮体上下動、およびワイヤ張力の時系列の実験結果と両モデルによる計算結果を比較する。図-2.10～図 2.12 は表 2.2 の実験番号1および2の波浪条件に対する仕事率、浮体上下動、およびワイヤ張力の時系列の実験値とモデル計算値を比較したものである。図中の凡例の「モデル計算 (流体力を無視した場合)」は第1モデル<sup>1)</sup>による計算結果で、「モデル計算 (流体力を考慮した場合)」は第2モデル<sup>3)</sup>による計算結果である。

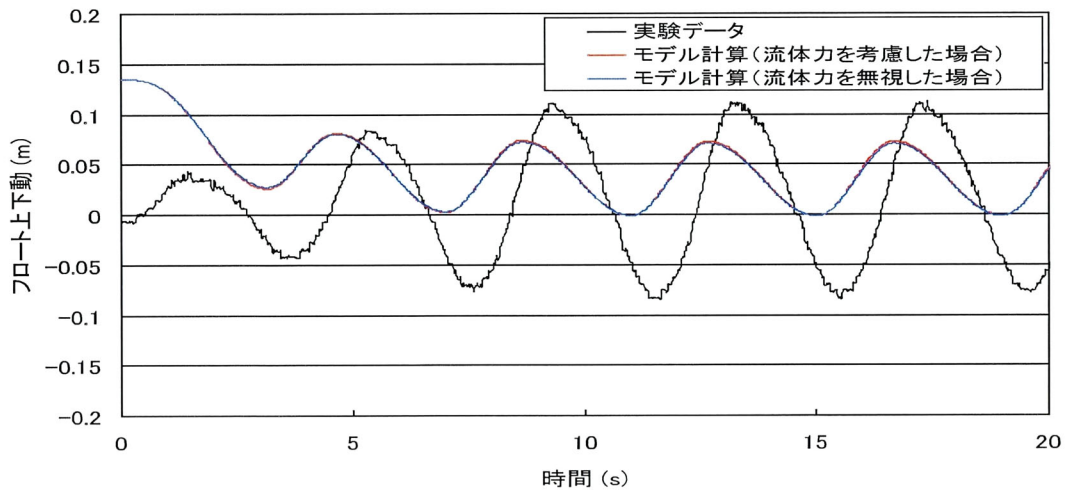


a) 実験番号1

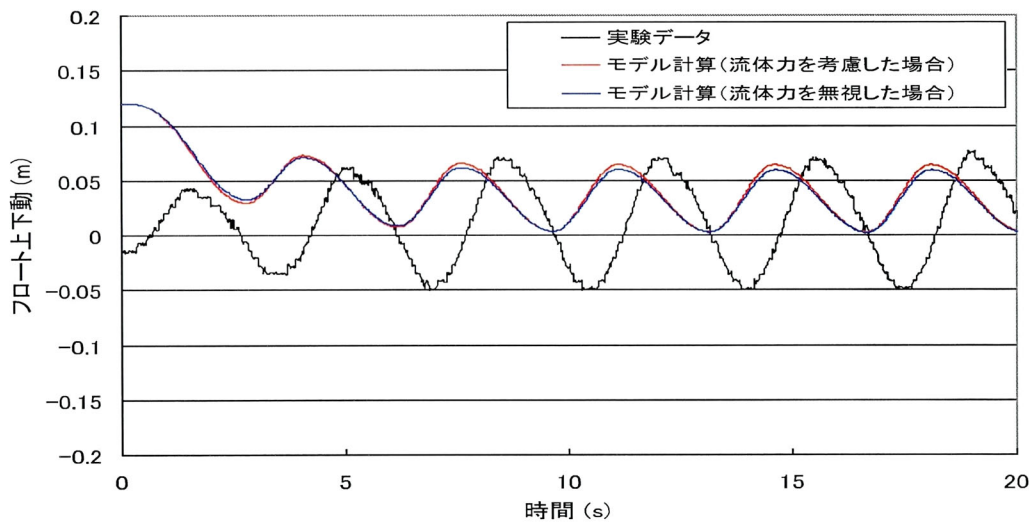


b) 実験番号2

図-2.10 仕事率の実験値とモデル計算値の時系列の比較

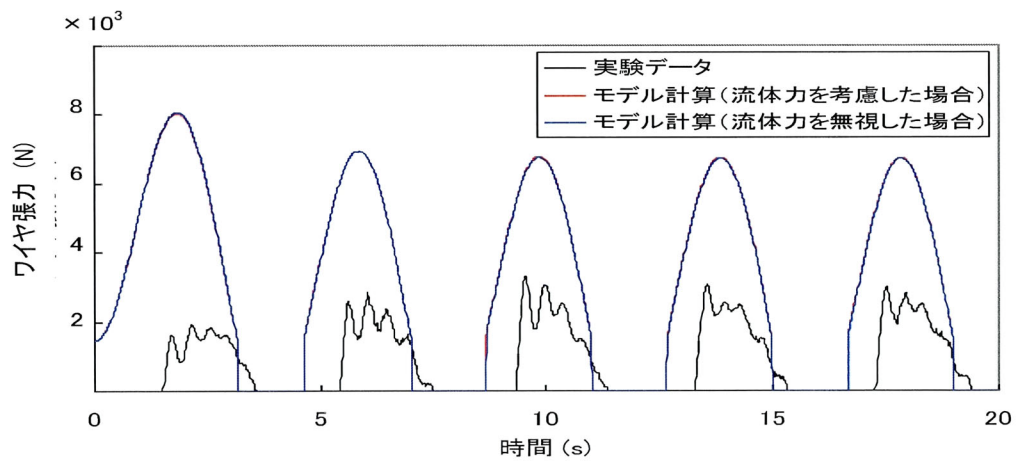


a) 実験番号1

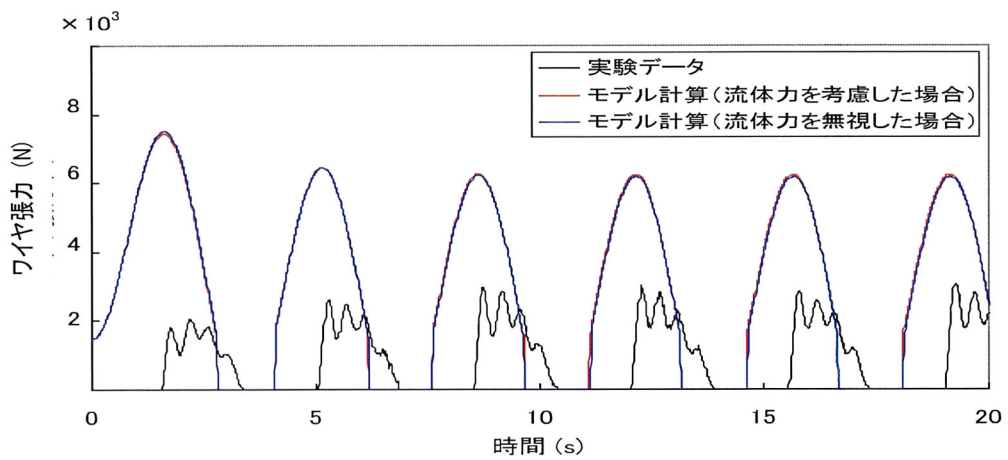


b) 実験番号2

図-2.11 浮体上下動の実験値とモデル計算値の時系列の比較



a) 実験番号1



b) 実験番号2

図-2.12 ワイヤ張力の実験値とモデル計算値の時系列の比較

図からわかるように、本水槽実験に関しては、第1モデル<sup>1)</sup>と第2モデル<sup>3)</sup>の結果にほとんど差がない。つまり、本研究で行った水槽実験レベルでは流体力を考慮した場合としない場合のどちらのモデルで計算しても大差がないといえる。この理由として、本実験においては、機械抵抗が水面波（特に波高）に対して過大であるためと考えられる。また図-2.10に示された仕事率の結果によると、計算値の時系列変化は実験値の時系列変化に先行している。また仕事率の計算値は第1波で大きくなっているが、これは図-2.11において第1波では浮体がほとんど抵抗なく上昇したのちに大きく下降したことを反映している。これはまたワイヤ張力が、図-2.12のように大きくなることに対応している。

図-2.11と図-2.12から、浮体が下降状態で平均位置に達した時にワイヤ張力はピーク値をとることがわかる。また、浮体上下動とワイヤ張力の計算値の再現性はあまりよくなく、浮体変位を過小評価し、ワイヤ張力を過大評価する結果になっている。これについては今後、モデルの精緻化を行う必要がある。前述のように、本検証実験のケースについては、モデル計算で流体力を考慮するか否かでほとんど変化がない。しかしながら、本研究は海上で使用する実機モデルを対象とすることから、前記の流体力を評価する必要がある。

### 2.3 実海域用装置の力学計算

実海域を想定して、より高い波高に対して評価を行った。また浮体を大重量とするなど装置諸元を見直した。装置諸元を表-2.3に示す。発電機の運動・電気の変換率を表す誘導電圧係数  $k_e=0.135$  (V/rpm)を1秒間あたりの回転角速度で表記すると、 $k_e=1.284$  (V sec/rad) であり、トルク定数  $k_t$  とほぼ同値となる。発電機はPM（永久磁石型）三相1.5KVA発電機（コギングレスタイプ）とし、一相定格電流8.1Aを想定した。また浮体の直径と高さはともに3mであり、浮体比重と喫水率の関係から、表-2.3のように浮体質量と釣合錘質量が決定される。また、波浪条件が厳しく高波高のため、浮体に作用する付加質量力、造波減衰力を無視できない。したがって、それら流体力を考慮した第2モデルで評価する。

表-2.3 実海域を想定した装置諸元

フロート比重	$\rho_f / \rho_w$	0.9
フロート喫水率		0.6
フロート質量 (t)	$M_f$	19.085
フロート直径 (m)	$d_f$	3.000
フロート高さ (m)	$l$	3.000
カウンターウェイト質量 (t)	$M_c$	6.044
駆動プーリ半径 (m)	$R_m$	0.420
慣性モーメント (kg・m)	$I$	10.002
ギア比	$G$	14
誘導電圧係数 (V/rpm)	$k_e$	0.135
トルク定数 (Nm/A)	$k_t$	1.284
負荷抵抗 ( $\Omega$ )	$r$	0.260
水の密度 (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho$	1025
機械系の粘性減衰係数 (N・m・s)	$C'$	567

また、機械系の粘性減衰係数は図1.25の装置を用いた羽田野ら<sup>4)</sup>の実験に従い、 $C'=567$ (N・m・s)に設定した。

#### (1) ラディエーション流体力<sup>6)</sup>と波強制力の評価

式(15)において、波強制力、付加質量、そして造波減衰の係数を三次元特異点分布法<sup>8)</sup>によって算出した。浮体の諸元は、実海域に設置することを想定し、表-2.4のように設定した。

表-2.4 実海域を想定した場合の浮体諸元

フロートの諸元								
半径(m)	高さ(m)	比重	質量(t)	喫水率	喫水(m)	KG(m)	排水重量(kN)	ウエイト重量(kN)
1.50	3.00	0.90	19.085	0.60	1.80	1.50	127.807	59.228
重心			メタセンター高さ		復元力(kN/m)	慣性モーメント		
X(m)	Y(m)	Z(m)	GM-x(m)	GM-y(m)		$I_x$ (t <sup>4</sup> m <sup>2</sup> )	$I_y$ (t <sup>4</sup> m <sup>2</sup> )	$I_z$ (t <sup>4</sup> m <sup>2</sup> )
0	0	-0.300	-0.288	-0.288	71.00	2.505E+01	2.505E+01	2.147E+01



これらの諸量を無限水深、水深 10m、水深 5m の場合の各々に対して、種々の波周期について算出した。その結果を図-2. 13 に示す。図中  $Ma$  ( $\text{KN s}^2/\text{m}$ ) は付加質量、そして  $C$  ( $\text{KN s}/\text{m}$ ) は造波減衰の係数である。図より、付加質量  $Ma$  は波周期が短い範囲では周期が長くなるにつれて徐々に減少し、周期 3 秒付近で最小値を示した後は波周期とともに漸増する傾向を示す。造波減衰の係数  $C$  は、波周期が短い範囲では波周期が長くなるにつれ増加し、周期 3~4 秒付近でピーク値を示した後、漸減する傾向を示している。また長周期になる程、付加質量と造波減衰の係数の水深による変化は顕著である。付加質量は無限水深の場合に大きく、造波減衰の係数は水深が最も浅い 5m 場合に大きいことが分かる。

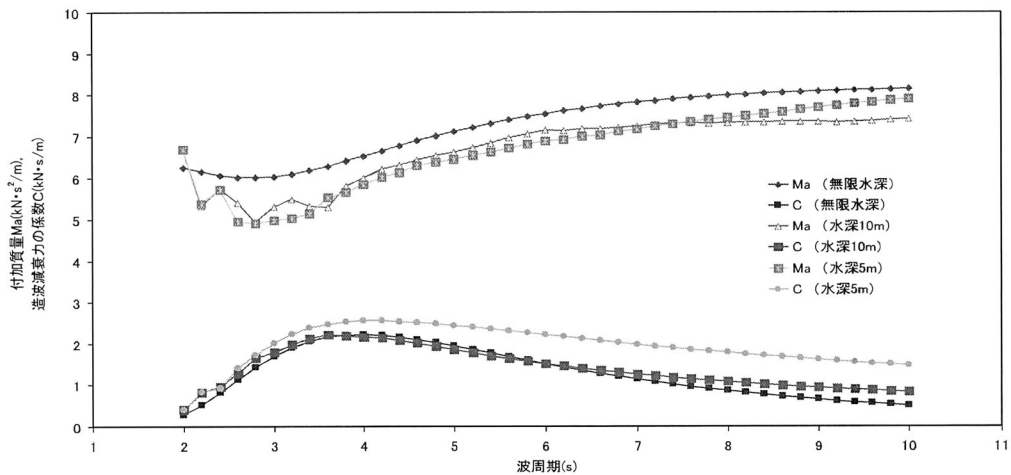


図-2.13 波周期と付加質量および造波減衰の係数の関係

次に波周期による波強制力の振幅  $A$  ( $\text{kN}/\text{m}$ ) と位相差  $\phi$  (rad) の変化を図-2. 14 に示す。左縦軸に波強制力の振幅を示し、右縦軸はその位相差を示している。図より、波周期が長くなるにつれ、波強制力の振幅は増大し、一定値に漸近している。また、波強制力の位相は、波周期が長くなるにつれて水面波の位相に近づくことがわかる。

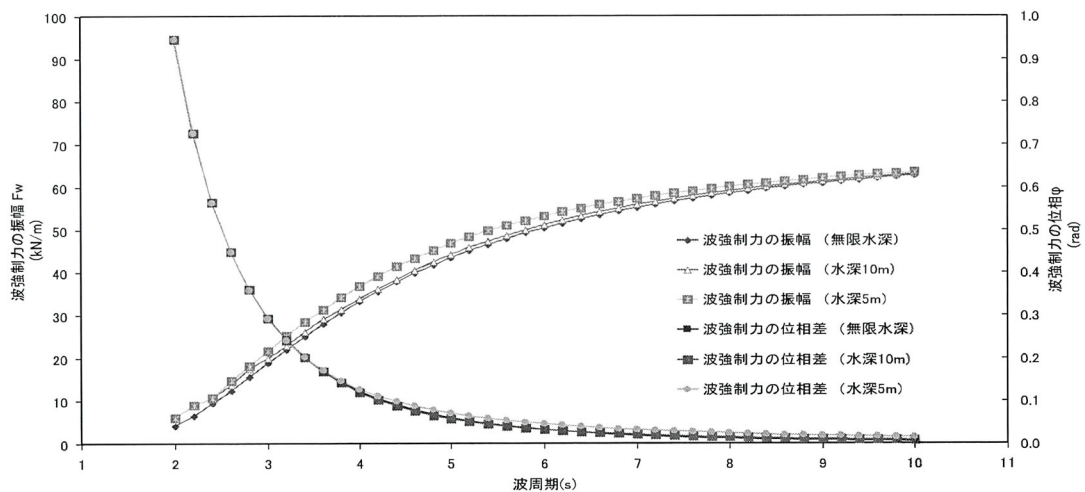
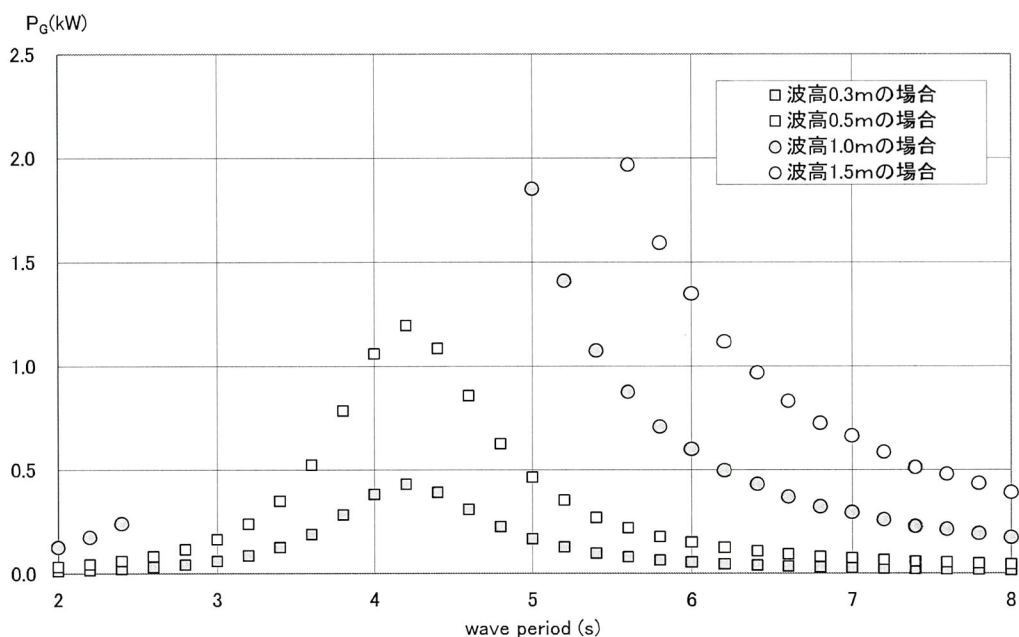


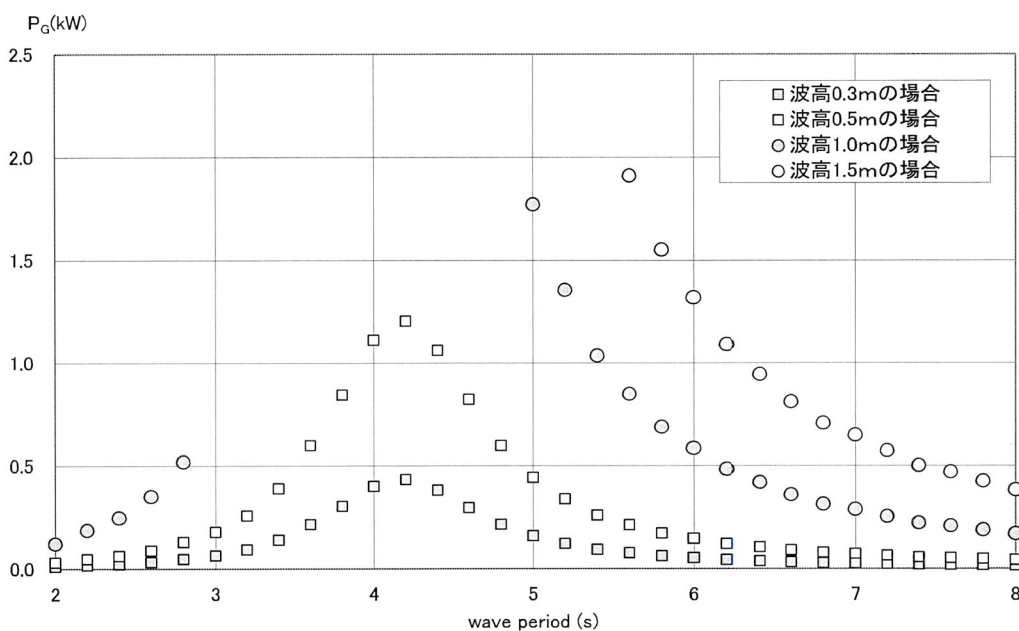
図-2.14 波周期と波強制力および位相差の関係

## (2) 各波高における平均発生電力

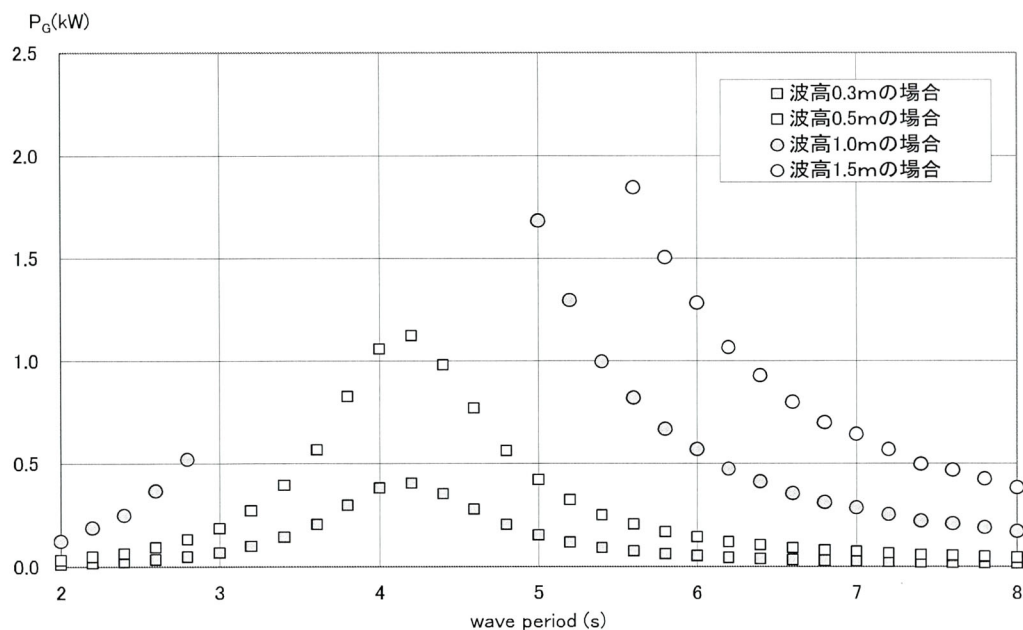
表-2.3と表-2.4の諸元の装置が、無限水深、水深10m、水深5mの各水深域において、種々の波浪条件下で稼動する場合について、前項の付加質量と造波減衰力を考慮して、波周期 $T$ による時間平均の発生電力 $P_G$ (kW)の変化を調べた。その結果を図-2.15に示す。前述のように、装置の安全上では浮体が宙吊り、もしくは全没水となる状態は好ましくないため、図ではこのような状態が生じる場合は除外している。すなわち、浮体が一部没水を維持する状態の結果だけを示している。



a) 無限水深の場合



b) 水深10mの場合



c) 水深5mの場合

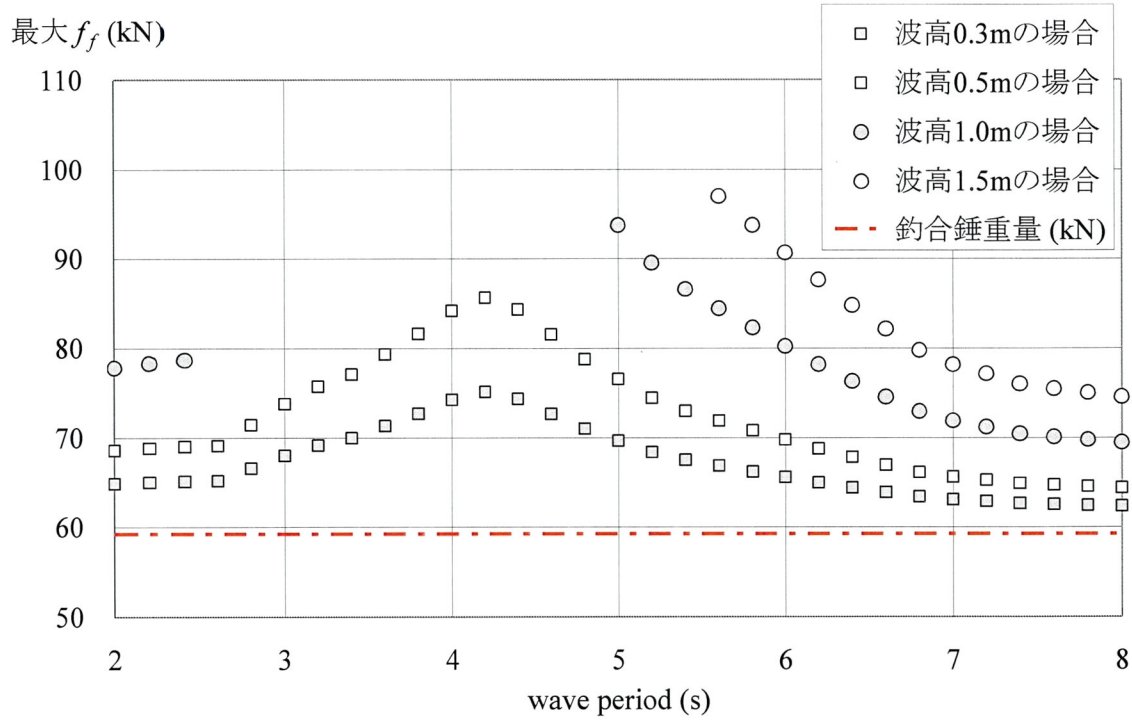
図-2.15 波周期と平均発生電力の関係

図によると、いずれの波高においても平均発生電力は周期が大体2秒から4秒の間では、周期と共に増大し、周期が4秒を越えたあたりで周期の増加と共に減少するようになる。図のa)~c)から水深の違いで比較すると、水深5mの場合には他の水深と比べて一部没水が維持できる条件の範囲が広いが、 $P_G$ の値自体については他の水深の場合と差がほとんどない。また、波周期3.0s~5.0sでプロットがない場合があるが、前述のようにこれは浮体が一部没水を維持できず、全没水もしくは宙吊りを起こしている状態を示している。つまりこの波周期周辺では、浮体の上下動が激しい状態で動揺していることを示す。これは共振を示唆する。なお、ここでは浮体が特定の喫水率のまわりで微小振幅する場合について計算した結果を示しているが、浮体上下動が大きい場合の流体力の算出では、非線形性を考慮した計算方法を適用する必要がある。

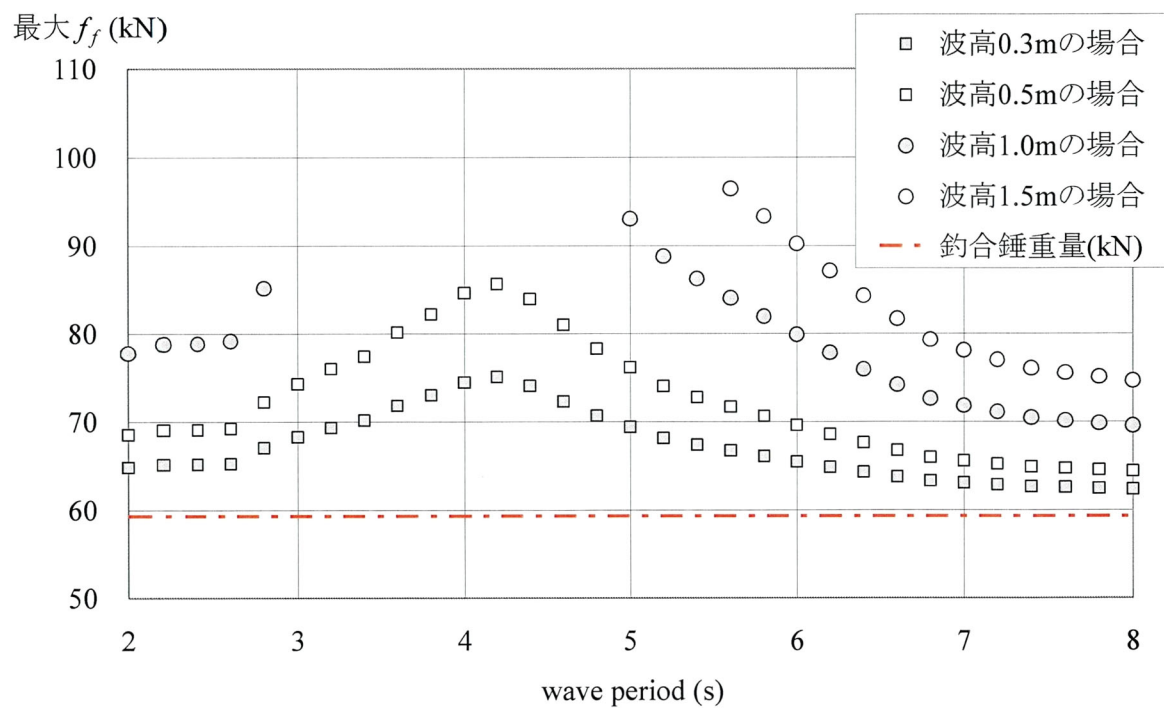
以上のように、装置が共振する状態では、発生電力の増大が見込まれるものの、浮体上下動が激しく、浮体が一部没水を維持できる波浪条件が狭められることが確認された。

### (3) 各波高における最大ワイヤ張力

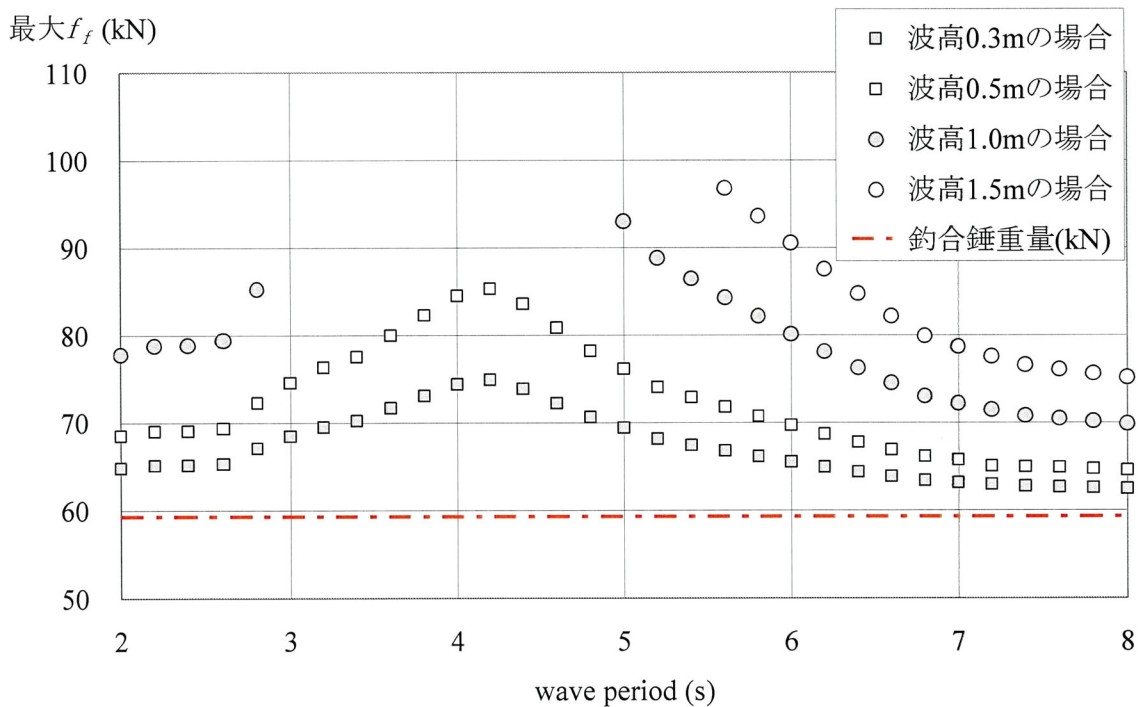
前項と同様に、表-2.3と表-2.4の諸元の装置が、無限水深、水深10m、水深5mの水深域において種々の波浪の条件下で稼動する場合について、前項の付加質量と造波減衰力を考慮して、波周期 $T$ によるワイヤ張力の最大値、最大 $f_f$ (kN)の変化を調べた。その結果を図-2.16に示す。図中の破線は釣合錘重量 $M_c g$ (kN)である。前項と同様で、装置の安全上では浮体が宙吊り、もしくは全没水となる状態は好ましくないため、図ではこのような状態が生じるケースは除外している。すなわち、浮体が一部没水を維持する状態の結果だけを示している。



a) 無限水深の場合



b) 水深10mの場合



c) 水深5mの場合

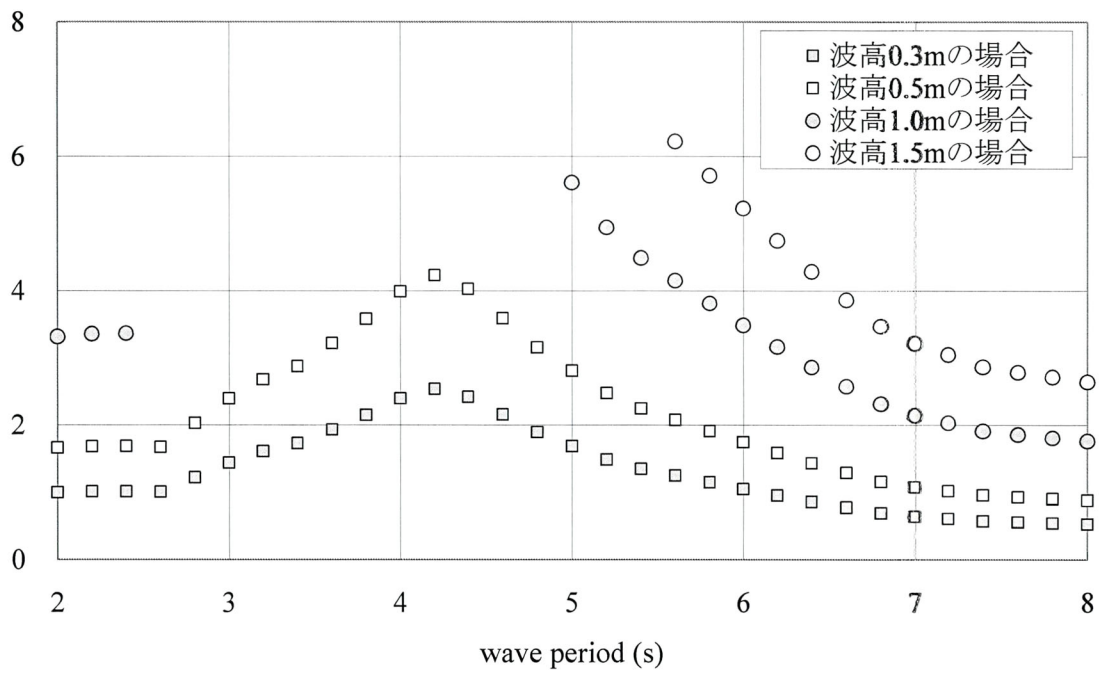
図-2.16 波周期と最大ワイヤ張力の関係

図より、波周期と最大 $f_f$ の関係は波周期と平均発生電力 $P_G$ の関係と同様で、最大 $f_f$ は、波周期が4秒以下では波周期と共に増加し、それより長い波周期では周期が長くなるにつれて漸減することがわかる。また最大 $f_f$ は常に釣合錘重量より大きい。図のa)~c)から水深の違いで比較すると、前項と同様、水深5mの場合には他の水深と比べて一部没水が維持できる条件が多いが、最大 $f_f$ の差はほとんどない。また、波周期3.0s~5.0sでプロットがない場合があるが、前述のようにこれは浮体が一部没水を維持できず、全没水もしくは宙吊りを起こした状態が生じるケースを示している。つまりこの波周期周辺では、浮体の上下動が激しく、ワイヤ張力も大きくなる。なお、この装置諸元では、最大100kN近くのワイヤ張力が発生すると評価される。さらに波周期2.6秒で変曲点が見られるが、これについては今後の検討課題である。

#### (4) 各波高における最大トルク

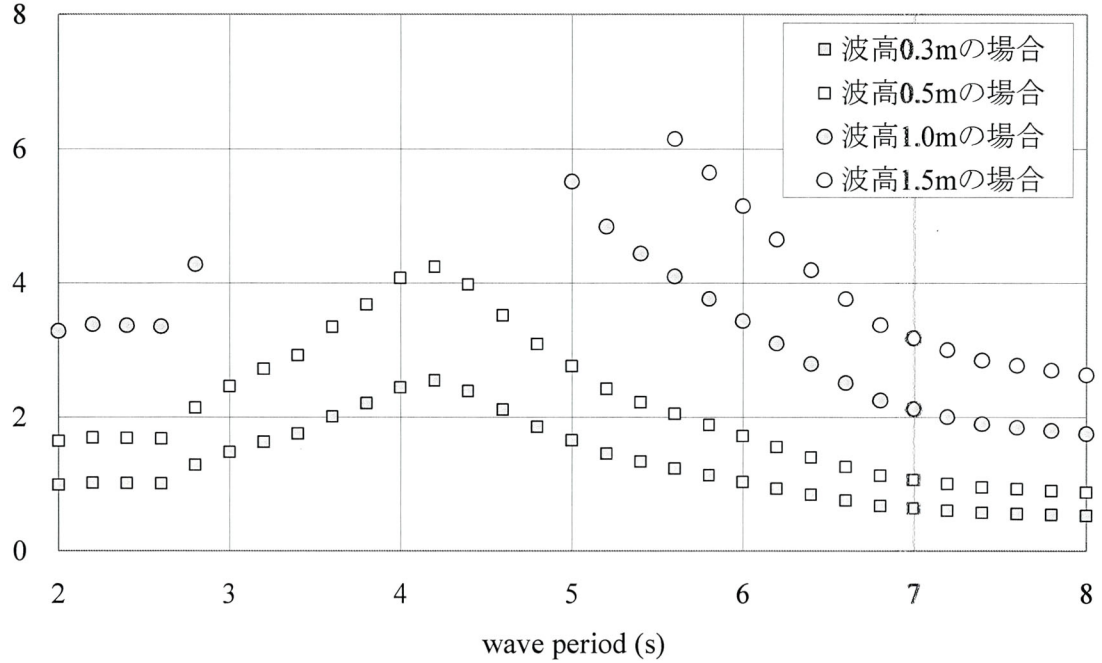
前項と同様に、表-2.3と表-2.4の諸減の装置が、無限水深、水深10m、水深5mの水深域において、種々の波浪の条件下で稼動する場合について、前項の付加質量と造波減衰力を考慮して、波周期 $T$ によるトルクの最大値、最大 $\tau$  (kN・m)の変化を調べた。その結果を図-2.17に示す。前項で述べたように、装置の安全上では浮体が宙吊り、もしくは全没水となる状態は好ましくないため、図ではこのような状態が生じるケースは除外している。すなわち、浮体が一部没水を維持する状態の結果だけを示している。

最大  $\tau$  (kNm)

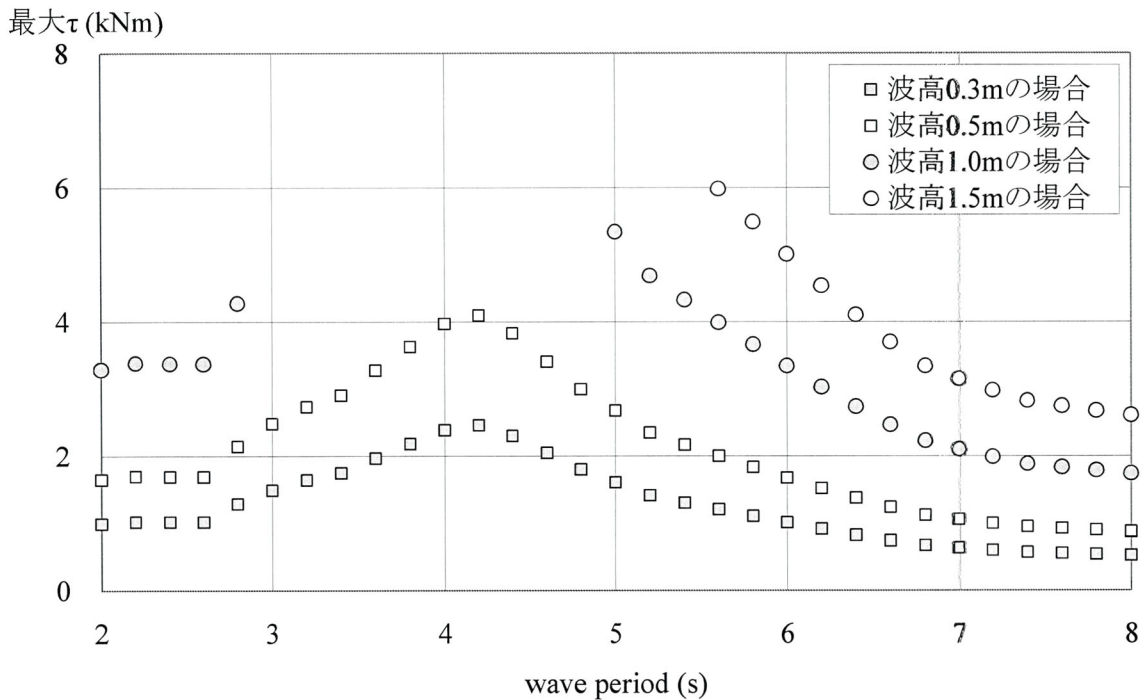


a) 無限水深の場合

最大  $\tau$  (kNm)



b) 水深10mの場合



c) 水深5mの場合

図-2.17 波周期と最大トルクの関係

最大トルクは前2図と同様に変化し、波周期が4秒あたりで最大となることがわかる。図のa)~c)から水深の違いで比較すると、前項と同様、水深5mの場合には他の水深と比べて一部没水が維持できる条件の範囲が広いが、最大トルクの差はほとんどない。また、波周期3.0s~5.0sでプロットがない場合があるが、前述のようにこれは浮体が一部没水を維持できず、全没水もしくは宙吊りを起こした状態が生じるケースを示している。つまりこの波周期周辺では、浮体の上下動が激しく、トルクも大きくなる。なお、この装置諸元では、最大6kNm近くのトルクが発生すると評価される。さらに波周期2.6秒で変曲点が見受けられるが、これについては今後の検討課題である。

以上、種々の波条件における平均発生電力、最大ワイヤ張力、最大トルクの変化を検討した。その結果、波周期3.0s~5.0sで上記の物理量はいずれも大きい。特に、波周期4.2sで最大値を示しており、装置の固有周期4.2sであることを示唆している。このことを踏まえ、次章では装置の共振特性解析を行う。

## 2.4 結語

以上、『浮体-釣合錘式波力発電装置』の力学モデルを、浮体-流体間の相互作用力として、付加質量と流体抵抗を考慮した『第1モデル』と波強制力、付加質量、造波減衰力を導入した『第2モデル』を提示した。力学モデルの検証のため、水槽実験を行い、実験結果と計算値の比較を行った。ただし、『第1モデル』では付加質量と流体抵抗を無視して計算した。また、海上での稼働を想定し、平均発生電力、最大ワイヤ張力および最大トルクの評価を行った。本章で得られた主要な知見は以下のようである。

1. 水槽実験による両力学モデルの検証の結果は、ワイヤの走行速度とワイヤ張力の積で評価した仕事率については、一定の評価ができたが、ワイヤ張力、浮体上下動と合わせて統一的に

良好な評価を得るには至らなかった。

2. 水槽実験による検証において、両モデルには大きな差異はなかった。これは実験水槽レベルでは流速が小さく、このため流体力を無視しても余り影響がないことを示す。しかしながら、実海域では波による流速が大きくなるから、流体と浮体の相互作用力を無視できず、波強制力、付加質量、造波減衰力を導入した『第2モデル』を採用することが必要である。
3. 実海域での稼働を想定し、三次元特異点分布法により付加質量、造波減衰力、波強制力を評価し、これを波周期別に表示した図-2.13, 14を得た。
4. 海上での稼働で想定される平均発生電力、最大ワイヤ張力、最大トルクの物理量を計算した結果、表-2.3と表-2.4の諸元の装置では、波周期3.0秒～5.0秒では浮体の上下動が激しく、上記の物理諸量の値も大きくなる。特に波周期4.2秒で上記の物理諸量は最大値を示しており、本システムの固有周期が4.2秒であることが示唆される。

今後の検討課題として、発生電力、ワイヤ張力、浮体上下動を統一的により高精度で再現できるようモデルの精緻化を図る必要がある。

#### 参考文献

- 1) 羽田野袈裟義, 種浦圭輔, 渡邊誠, 中野公彦, 齊藤俊, 松浦正己: 浮体式波力エネルギー変換の力学, 土木学会論文集 B, Vol.62, No.3, pp.270-283, 2006.
- 2) Kesayoshi Hadano, Kimihiko Nakano, Keisuke Taneura, Kyo Ohgi, Pallav Koirala: On the occurred eclectic power of the float-type wave generation device, Proceeding Techno-Ocean 2002, pp. 4-7. CD ROM.2002.
- 3) 種浦圭輔, 羽田野袈裟義, 米山治男, 池上国広, 中野公彦, Pallav KOIRALA: 可動物体型波力発電装置の共振特性の検討, 土木学会論文集 B, Vol.66, No.2, pp.196-206.2010.
- 4) 羽田野袈裟義, 種浦圭輔, 渡邊 誠, 中野 公彦, 齊藤 俊, 松浦 正己: 浮体式波力エネルギー装置の力学計算について, 土木学会水工学委員会 流体力の評価とその応用に関する研究論文集, Vol.3, pp.97-102. 2004.
- 5) Sarpkaya, T. and Issacson, M: Mechanics of wave forces on offshore structure, Van Northland Reinhold Co., 1981.
- 6) 元良誠三監修: 船体と海洋構造物の運動学 (改訂版), 成山堂, pp.63-79, 1997.
- 7) 種浦圭輔, 羽田野袈裟義, Pallav Koirala, 松岡克弥: 畜力機能を有した弾性体を導入したつるべ式波力エネルギー変換装置の力学, 土木学会海洋開発論文集, Vol.24, pp.111-115, 2008.
- 8) Garrison, C.J.: Hydrodynamic loading of large offshore structures: Three dimensional source distribution method, Numerical Method in Offshore Engineering, Chapter 3, John Wiley & Sons, 1978.



### 第3章 浮体-釣合錘式波力エネルギー変換装置の共振特性解析

前章では、浮体-釣合錘式波力エネルギー変換システムの力学モデルを検討した。その結果、波周期 3.0s~5.0s の範囲において、発生電力、ワイヤ張力、浮体上下動の物理量がいずれも大きくなり、この周期辺りに共振周期が存在することが示唆された。このため本章では共振特性解析を行う。なお、第2章では波強制力の評価は、水面が静止して浮体が上下動する状況でなければ困難であったため水面変動を無視して計算を行った。しかしながら、後述の式(26)の変位応答倍率で明らかのように、共振特性解析では波周期の条件が必要である。このように、厳密には水面変動を評価する必要があるため、本章では支配方程式(式(16))に水面変動を考慮する。

本力学モデルは式(16)のように、振動方程式型の2階常微分方程式で構成されている。これらのことを考慮し、本章では高出力の装置の設計を最終目的として、共振特性解析<sup>1)</sup>を行う。解析は時々刻々の浮体変位と水面変位との相対座標<sup>1),2)</sup>を用いて行い、解析の結果は波の作用下で稼働中の浮体の上下動振幅と波振幅との比としての変位応答倍率<sup>3)</sup>で共振特性を評価する。

また、本システムの動力源が浮体の上下運動であるため、変位応答倍率<sup>3)</sup>を評価することで装置の高出力・高効率化の目途が立つ。そして、共振解析により高出力・高効率の装置諸元が簡単に分かる。

#### 3.1 共振解析理論<sup>1)</sup>

力学モデルの計算式、すなわち式(16)は造波減衰、機械ロスおよびエネルギー変換を減衰項とする減衰振動の式であり、水面変動が強制項となっている。この式は駆動プーリの回転角に関する方程式であるが、プーリ回転角はワイヤの移動量を介して浮体上下動と関係づけられる。

本装置の浮体上下動の共振を考える場合、通常の質点の場合と異なり、浮体変位は固定座標ではなく水面変位との相対座標で検討する。この状況を図-3.1に示す。図中の  $m$  は後述の式(16)の左辺第1項の係数、 $C''$ は同じく第2項の係数、そして  $k$  は同じく第3項の係数である。質点は、水面において作用している波強制力の下で水面と相対変位  $z$  で運動している。この  $z$  により、ばねによる復元力と類似の形で浮力が作用する。

まず図-3.1より、式(16)に水面変動を考慮すると次式を得る。

$$\left(\frac{I}{R_m^2} + (M_f + M_c + M_a)\right) \left(R_m \frac{d^2\theta}{dt^2}\right) + \left(C + \frac{1}{R_m^2} C' + \frac{1}{R_m^2} \frac{G^2}{r} k_t k_e\right) \left(R_m \frac{d\theta}{dt} - \dot{x}_w\right) + \frac{1}{4} \pi D_f^2 \rho_w g (R_m \theta - x_w) = F_w \cdot \frac{H}{2} \quad (20)$$

この設定で、質点の水位に対する相対変位は、次式により与えられる。

$$z = R_m \theta - x_w \quad (21)$$

この式より、駆動プーリ回転角  $\theta$  は、次のように表現される。

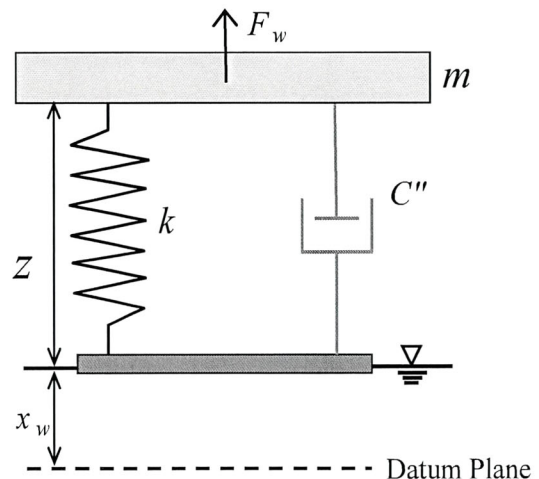


図-3.1 エネルギー変換システムの共振解析モデル

$$\theta = \frac{1}{R_m}(z + x_w) \quad (22)$$

式(20)に $\theta$ を代入し、さらに整理すると次式が得られる。

$$\begin{aligned} & \left( \frac{I}{R_m^2} + (M_f + M_c + M_a) \right) \frac{d^2 z}{dt^2} + \frac{1}{R_m^2} \left( C \cdot R_m^2 + C' + \frac{G^2}{r} k_r k_e \right) \frac{dz}{dt} + \frac{1}{4} \pi D_f^2 \rho_w g z \\ & = F_w \cdot \frac{H}{2} - \left( \frac{I}{R_m^2} + (M_f + M_c + M_a) \right) \frac{d^2 x_w}{dt^2} \end{aligned} \quad (23)$$

この式を用いて浮体上下動の共振特性を検討する。

### (1) 固有振動数と変位応答倍率<sup>3)</sup>

式(23)から、システムの不減衰固有振動数 $\omega_n$ と減衰比 $\zeta$ はそれぞれ次のように求められる。

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{\rho_w g \pi D_f^2}{4 \left\{ \frac{I}{R_m^2} + (M_c + M_f + M_a) \right\}}} \quad (24)$$

$$\zeta = \frac{C''}{2\sqrt{mk}} = \frac{\left( C \cdot R_m^2 + C' + \frac{G^2 k_r k_e}{r} \right)}{2 \sqrt{\left( I \cdot R_m^2 + (M_c + M_f + M_a) R_m^4 \right) \frac{\rho_w g \pi D_f^2}{4}}} \quad (25)$$

また、強制振動による相対変位 $z$ の振幅を $x_0$ 、水面変動 $x_w$ の振幅を $x_{stat}$ とすると、その比は次式となる。

$$\frac{x_0}{x_{stat}} = \frac{1}{\sqrt{\left( 1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2} \right)^2 + \left( 2\zeta \frac{\omega}{\omega_n} \right)^2}} \quad (26)$$

これが変位応答倍率であり、共振の度合いを判断するパラメーターである<sup>4)</sup>。

## 3.2 計算結果

共振の基本的性質を調べるために、式(26)に示す浮体上下動の変位応答倍率 $x_0/x_{stat}$ と発生電力 $P_G$ 、そして最大ワイヤ張力 $f_f$ と波周期 $T$ の間の関係を調べた。浮体の諸元は実機を想定し、前章の浮体および装置を用いることとし、それらの諸元は、表-2.3と表-2.4を用いる。

### (1) 浮体変位による検討

図-3.2は波周期による変位応答倍率の変化を表している。表-2.3と表-2.4の諸元に対して、システムの不減衰固有角振動数 $\omega_n$ 、減衰比 $\zeta$ を種々の波周期について算出した。その結果、波周期4.2秒のとき、 $\omega_n=1.494$ 、 $\zeta=0.131$ である。また変位応答倍率 $x_0/x_{stat}$ は、波周期が不減衰固有周期 $2\pi/\omega_n$ に等しい時に最大となる。なお、この図には波高の効果が表れないことを付記する。

次に波周期による変位応答倍率の違いを種々の水深について調べた結果を図-3.3に示す。それによると、水深10mと無限水深の場合はあまり差がない。つまり水深10m以上では変位応答倍率の変化はほぼ一致すると考えられる。しかし水深5mの場合、これより変位応答倍率が小さくなっている。これは式(26)から考察すると、造波減衰の係数 $C$ が大きく、式(26)の減衰比 $\zeta$ が大きくなり、このため変位応答倍率が低減した結果と考えられる。

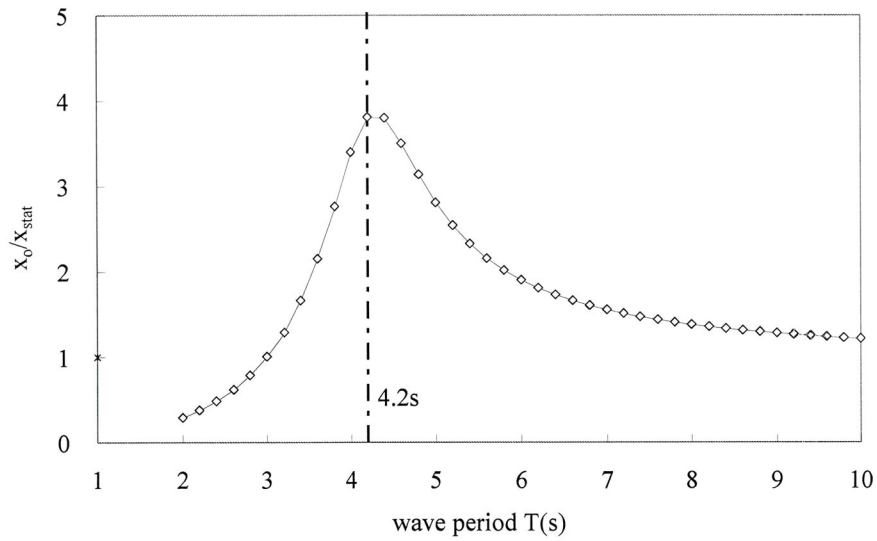


図-3.2 波周期と変位応答倍率の関係

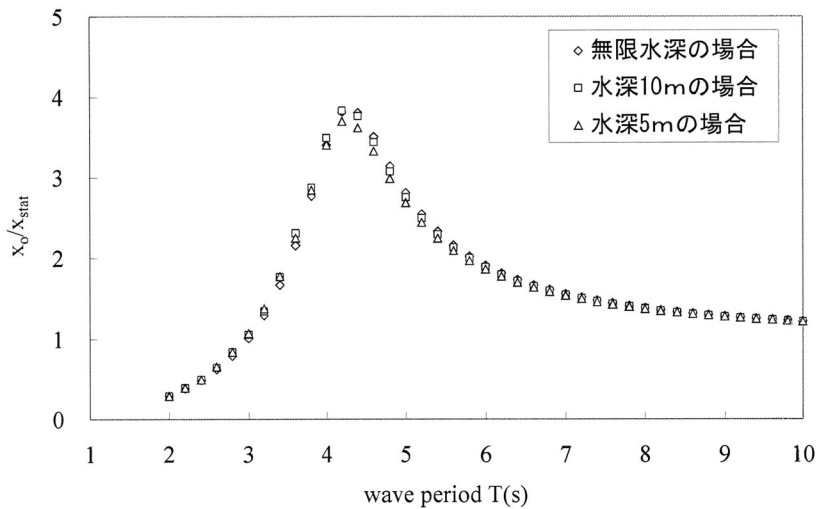


図-3.3 種々の水深についての波周期と変位応答倍率の関係

### 3.3 結語

以上、本提案のシステムの共進解析モデルを構築し、不減衰固有振動数  $\omega_n$ 、減衰比  $\zeta$ 、そして浮体上下動の変位応答倍率  $x_0/x_{stat}$  の式として、式(24)、式(25)そして式(26)を得た。実海域に本システムを設置する場合として想定した装置諸元で共振解析を行った結果、表-2.3 と表-2.4 の諸元のシステムの固有周期は 4.2 秒であることが確認された。前章の物理諸量の評価において、平均発生電力、最大ワイヤ張力、最大トルクとも波周期 4.2 秒で最大値をとっており、共振周期では、浮体の上下動も大きくワイヤ張力、トルクとも大きく、その結果発生電力が大きくなる。

また、この周期では、高い波高を持った波が来襲した場合、浮体が宙吊りもしくは全没水を引き起こし、安定して一部没水を維持し、上下運動しないことも前章の検討から明らかである。つまり、共振周期内で装置が稼動することは、発生電力は大きくなるが、装置の安全性の面で問題があることを意味している。

そこで本システムの高出力・高効率化を図るならば、次のようなステップで行うことが推奨される。

1. 設置予定海域の波浪条件，特に卓越波周期を調べる．共振特性解析により，その卓越波周期と同程度の固有周期をもつ装置諸元を求める．
2. 力学モデルの計算によって，浮体が一部没水状態を維持しながら稼動することを確認する．

しかしながら，この作業は力学モデルだけでも可能であるが，本システムの諸元を変更するたびに発生電力と波周期図を作成しなければならない手間がある．そこで，次章では，解析が簡便な本共振特性解析のみを用い，上記の1と2を満足する手法を提案し，浮体が安全に稼動し，かつ獲得発生電力が大きい，高出力・高効率の装置の諸元を系統的に決定する方法を述べる．

## 参考文献

- 1) 種浦圭輔，羽田野袈裟義，米山治男，池上国広，中野公彦，Pallav KOIRALA：可動物体型波力発電装置の共振特性の検討，土木学会論文集 B，Vol.66, No.2, pp.196-206.2010.
- 2) 種浦圭輔，中野公彦，Pallav KOIRALA，羽田野袈裟義：浮体式波力発電装置の共振特性，機械学会論文集 C，Vol.76, No.761, pp.44-50. 2010.
- 3) 國枝正春；実用機械振動学，理工学社，pp.201-218, 1999.
- 4) 小坪清真：入門建設振動学，森北出版，pp.38-43, 1995.

## 第4章 共振特性解析によるシステムの高出力・高効率化の諸元の検討

本章に先立ち、第2章では浮体・釣合錘型波力エネルギー変換装置の力学モデルを構築し主要な力学諸量の変動特性を調べた。第3章では高出力・高効率システムの諸元を検討する基礎として共振特性の検討を行った<sup>1)</sup>。本章では、実海域での稼動を想定し、第3章で示した共振解析の結果を利用して高出力・高効率システムの諸元を効率的に決定する手順を示す。その際、システムの安全な稼動には浮体が常に一部没水を保つことが必要なこと<sup>2),3)</sup>を考慮してシステム諸元の決定を行う。

### 4.1 共振特性解析を利用した高出力・高効率化の検討<sup>1)</sup>

第3章の検討の結果、次のことが分かった。1) 浮体上下動の変位応答倍率 $x_0/x_{stat}$ は、周波数比 $w/w_n$ と1との差、そして減衰比 $\zeta$ が小さいほど大きい。2) 固有角振動数 $w_n$ は浮体断面積 $\pi D_f^2/4$ が大きいほど、そして $I/R_m^2$ と質量和 $M_c+M_f+M_a$ が小さいほど大きい。3) 減衰比 $\zeta$ は $CR_m^2$ 、 $C'$  および $G^2 k_e k_t/r$  が大きいほど大きく、そして $I/R_m^2$ 、質量和 $M_c+M_f+M_a$  および浮体断面積 $\pi D_f^2/4$ が小さいほど大きい。

上で述べた2)と3)を言い換えれば、次のようになる。すなわち $I/R_m^2$ と質量和 $M_c+M_f+M_a$ は固有角振動数 $w_n$ と減衰比 $\zeta$ の両方を減少させ、浮体断面積は $\pi D_f^2/4$ は、 $w_n$ を増加させて $\zeta$ を減少させる。さらに、 $CR_m^2$ 、 $C'$  および $G^2 k_e k_t/r$  は $\zeta$ を増大させるが $w_n$ には影響を及ぼさない。

また本システムは、装置の共振周期に近い波周期において発生電力は大きいものの、浮体が宙吊り、全没水、一部没水を繰り返すことが生じやすく、これは装置の安全上好ましくない。このような事態を避けるには変位応答倍率 $x_0/x_{stat}$  (式(26))を抑えることが必要である。そのためには、減衰比 $\zeta$  (式(25))を大きくすればよい。減衰比 $\zeta$ を大きくするには、造波減衰係数 $C$ 、ギア比 $G$ 、誘導電圧係数 $k_e$ 、トルク係数 $k_t$ を大きくし、負荷抵抗 $r$ を小さくすればよい。また、式(8)より発生電力を大きくするには、ギア比 $G$ と誘導電圧係数 $k_e$ を大きくし、負荷抵抗 $r$ を小さくすればよい。

### 4.2 数値的検討

上述のように、変位応答倍率 $x_0/x_{stat}$ を抑えるための条件と発生電力を大きくするための条件が、ギア比 $G$ と誘導電圧係数 $k_e$ を大きくし、負荷抵抗 $r$ を小さくすることである。ただし、駆動プーリの回転速度 $d\theta/dt$ はこれらのパラメータを含む微分方程式(式(16))の解として与えられるため、発生電力については事情が少し複雑であるので、駆動プーリの回転速度と密接な関係がある変更可能な諸元として、駆動プーリの半径を取り上げるが適当である。また、誘導電圧係数 $k_e$ とトルク係数 $k_t$ は採用する発電機により変化し、負荷抵抗 $r$ も自由にとれる。したがって、ここでは駆動プーリの半径とギア比の変化による効果を調べる。よって、駆動プーリの半径とギア比以外の浮体と装置の諸元を表-2.3と表-2.4のように固定し、共振特性解析によって種々の波周期における変位応答倍率と本システムの固有周期を求めた。また、力学モデルから平均発生電力を評価し、波周期と平均発生電力の関係を確認し、共振特性解析のみにより諸元の決定を簡略化することの可能性を検討する。

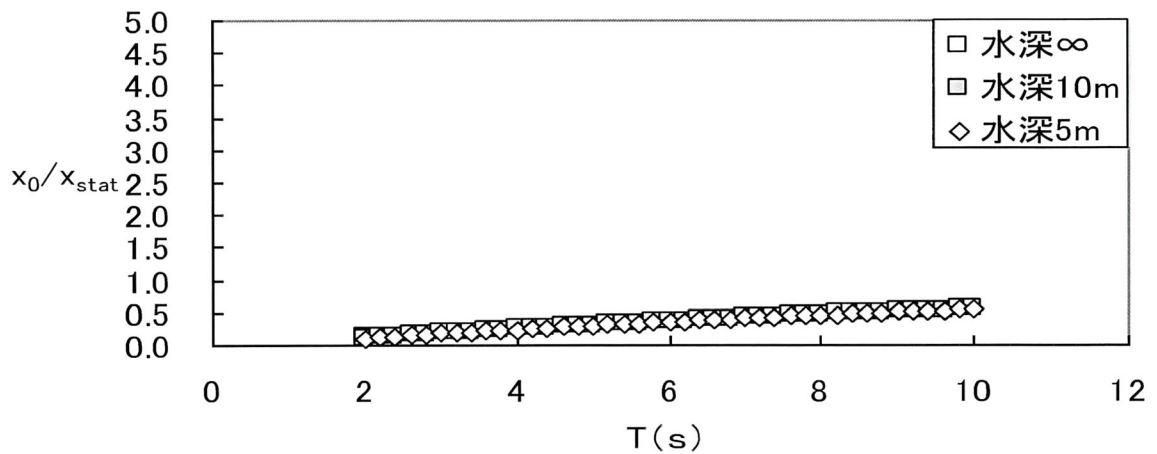
#### (1) 駆動プーリ径の諸元の検討

まず、駆動プーリの半径は0.10, 0.14, 0.15, 0.20, 0.25, 0.28, 0.30, 0.35, 0.40, 0.42, 0.45mの計11パターンを考える。駆動プーリの半径により変化する駆動プーリの質量、慣性モーメントは表-4.1のようになる。第2章で示した水槽実験駆動プーリの半径0.14mにおいて、質量は12.6kgである。これらの値を基準にワイヤを巻き掛ける駆動プーリの厚さを一定とすることで、駆動プーリの面積と質量は比例関係になる。その結果、駆動プーリの慣性モーメントは表中に示す通りになる<sup>4)</sup>。駆動プーリの種々の半径に対して、無限水深、水深10m、水深5mの場合での流体力を考慮し、式(26)

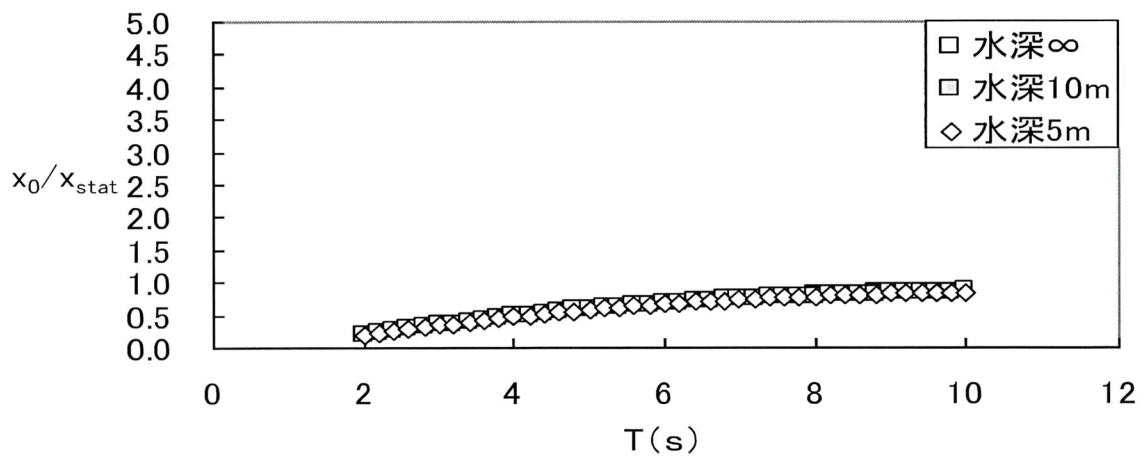
より変位応答倍率を求めた。その結果を図-4.1に示す。

表-4.1 検討する駆動プーリの半径、質量及び慣性モーメント

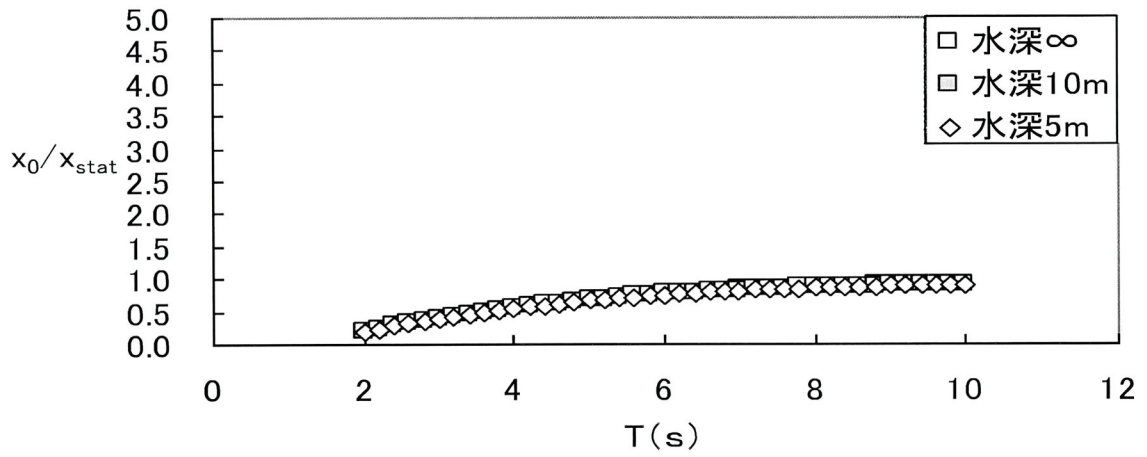
駆動プーリの半径	駆動プーリの質量	慣性モーメント
$R_m(m)$	$m_R(kg)$	$I(kg \cdot m^2)$
0.1	6.43	0.03
0.14	12.60	0.12
0.15	14.46	0.16
0.2	25.71	0.51
0.25	40.18	1.26
0.28	50.40	1.98
0.3	57.86	2.60
0.35	78.75	4.82
0.4	102.86	8.23
0.42	113.40	10.00
0.45	130.18	13.18



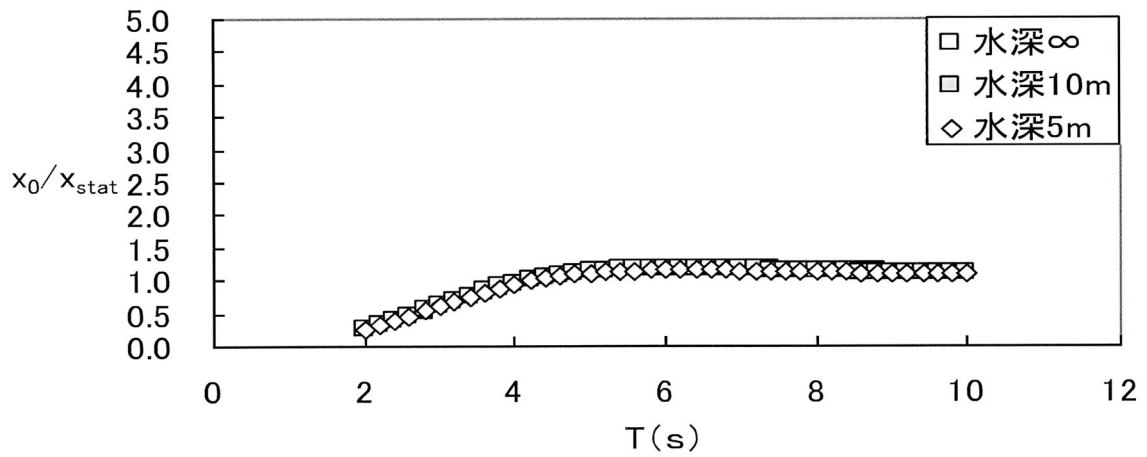
a) 駆動プーリ半径 0.10m の場合



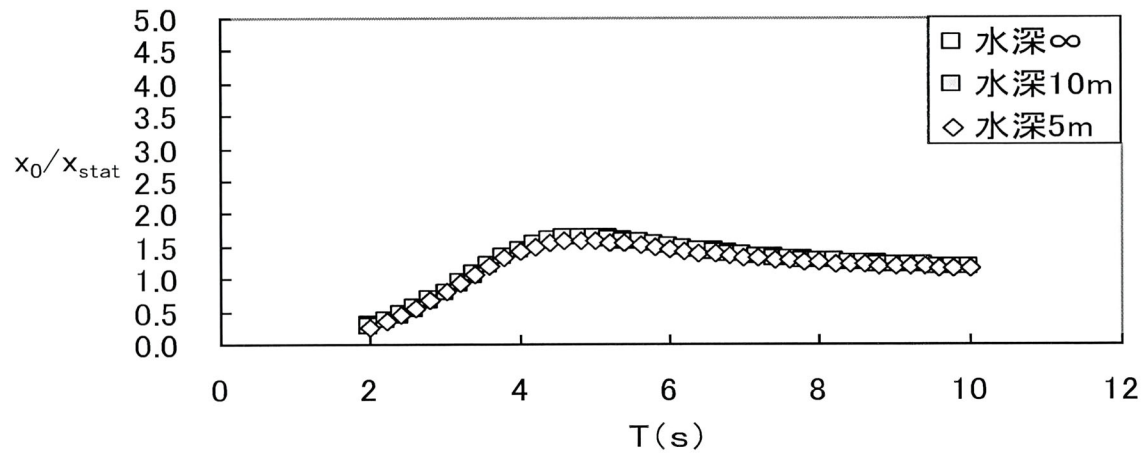
b) 駆動プーリ半径 0.14m の場合



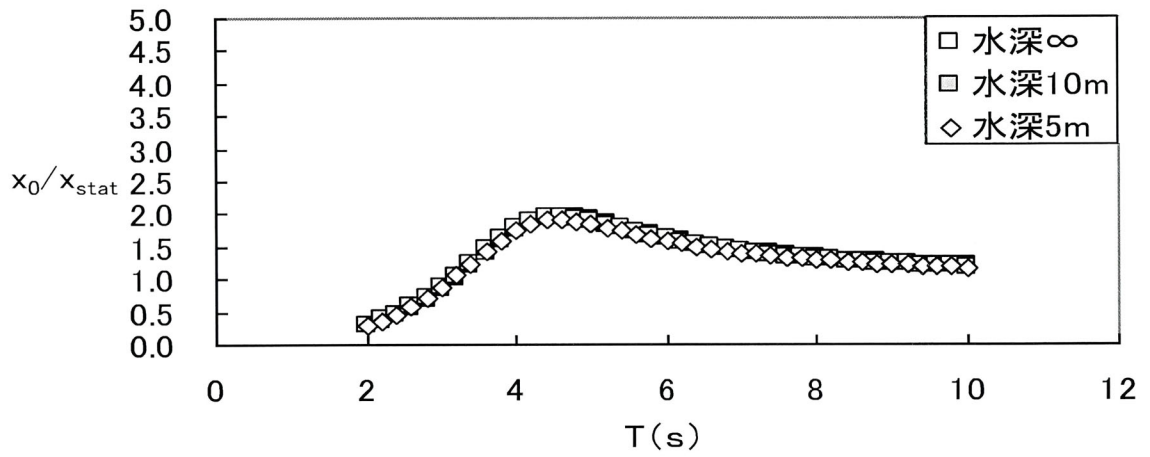
c) 駆動プーリ半径 0.15m の場合



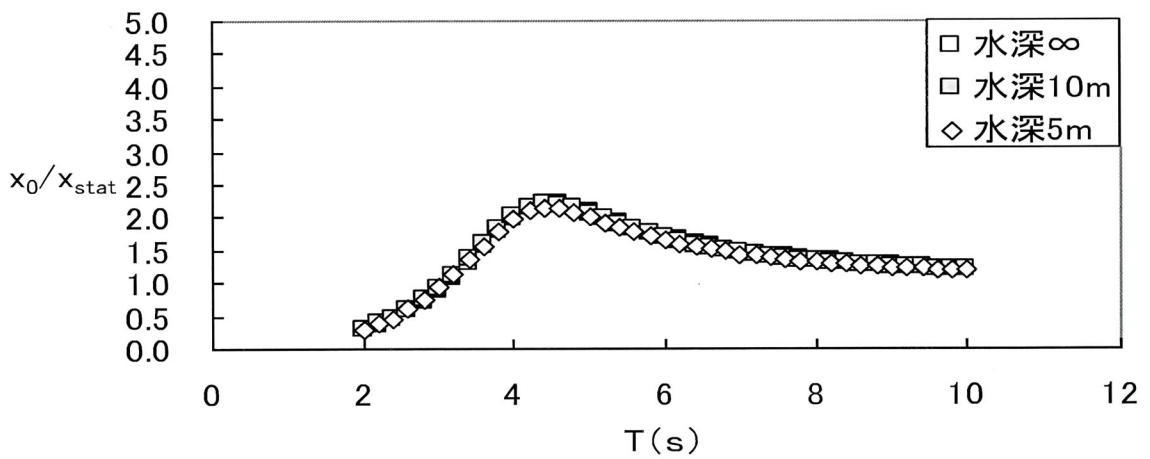
d) 駆動プーリ半径 0.20m の場合



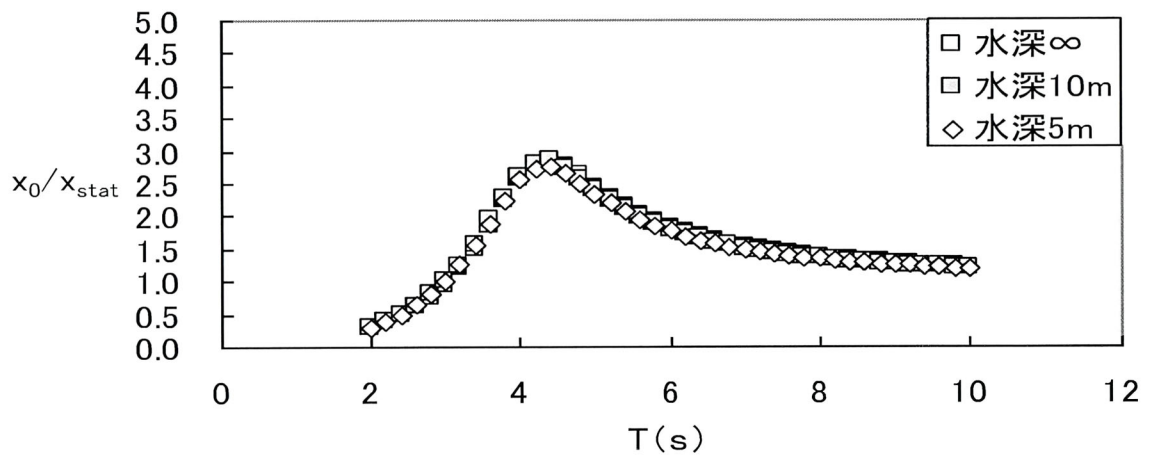
e) 駆動プーリ半径 0.25m の場合



f) 駆動プーリ半径 0.28m の場合

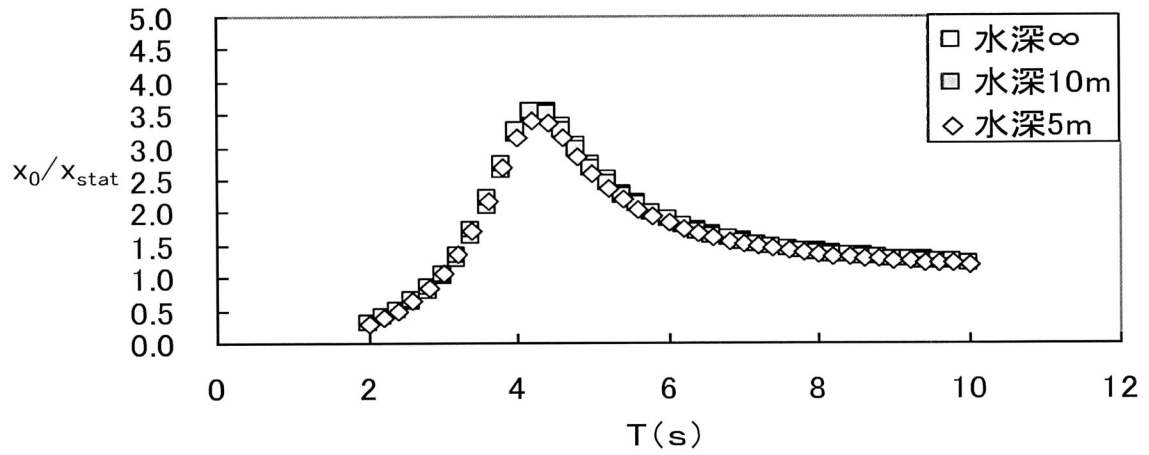


g) 駆動プーリ半径 0.30m の場合

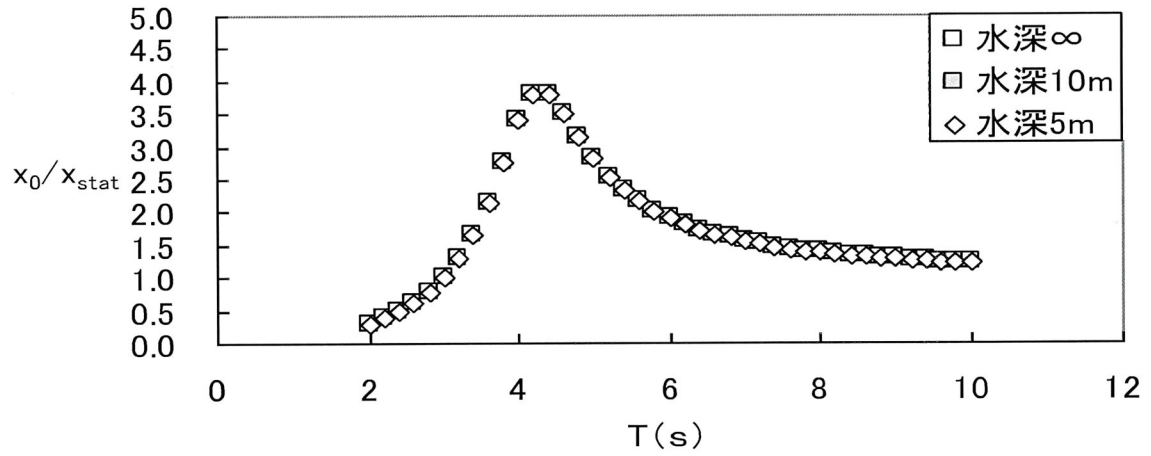


h) 駆動プーリ半径 0.35m の場合

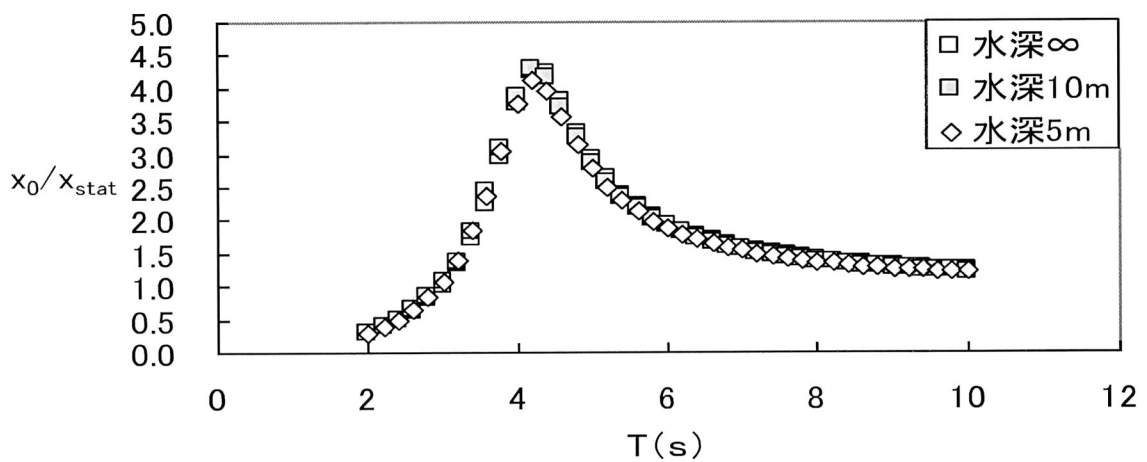




i) 駆動プーリ半径 0.40m の場合



j) 駆動プーリ半径 0.42m の場合



k) 駆動プーリ半径 0.45m の場合

図-4.1 駆動プーリ半径・水深別の変位応答倍率

図より、多少水深 5m の変位応答倍率の値が小さいものの、水深による変化はあまり見られず変位応答倍率の値は水深による影響がないことがわかる。また、駆動プーリの半径の変化に伴う変位応答倍率の変化に着目すると、駆動プーリの半径が 0.25m より小さいと、変位応答倍率の値はほぼ横ばいの状態となり、共振現象が見受けられない。しかしながら、駆動プーリの半径が 0.25m 以上の大きさになると、変位応答倍率は周期 4.2 秒以下の範囲では波周期の増加と共に急激に増加し、波周期 4.2 秒あたりでピーク値をとり、その後は緩やかに減少していくことがわかる。このことから、4.2 秒程度が本システムの固有周期であると判断できる。また、ここで検討した諸元の装置の固有周期は駆動プーリの半径、水深に関らず、4.2 秒程度であるといえる。

次に、駆動プーリの半径と変位応答倍率の関係を検討するため、縦軸に波周期 4.2 秒の場合について変位応答倍率の値、横軸に駆動プーリの半径の値をとった図を図-4.2 に示す。波周期が 4.2 秒の場合、駆動プーリの半径の増加と共に変位応答倍率のピーク値が増加していることがわかる。このことから、共振の効果は駆動プーリの半径が大きいほど顕著である。

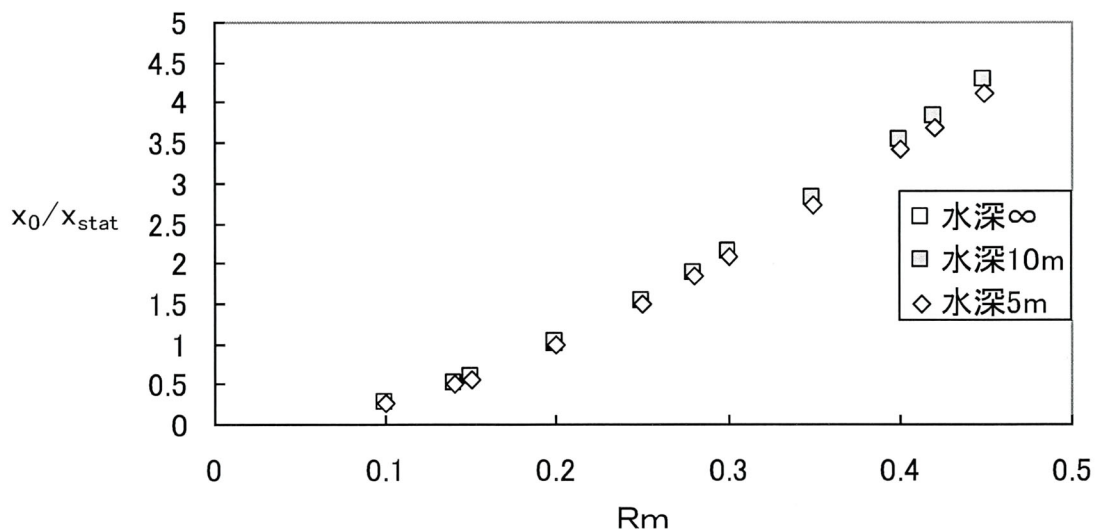
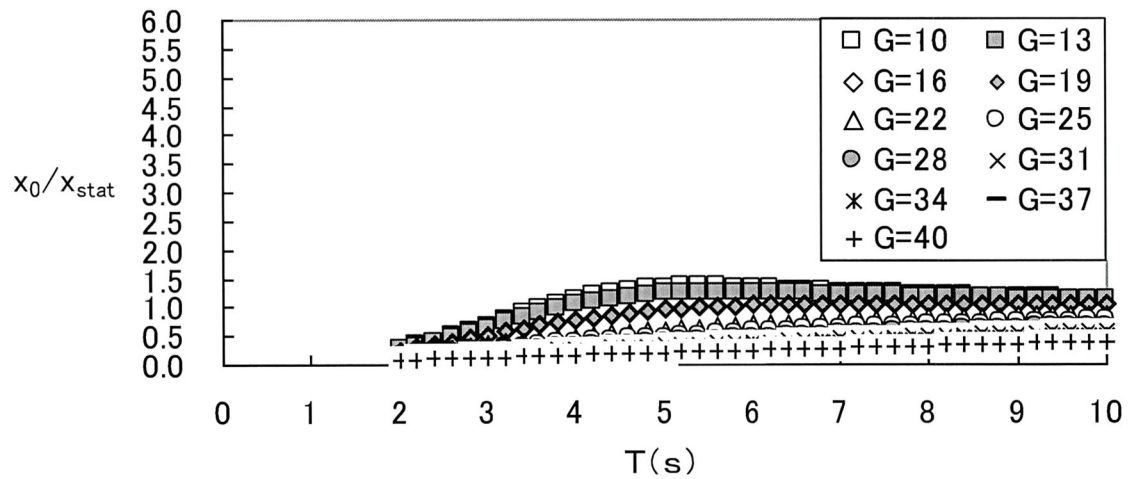


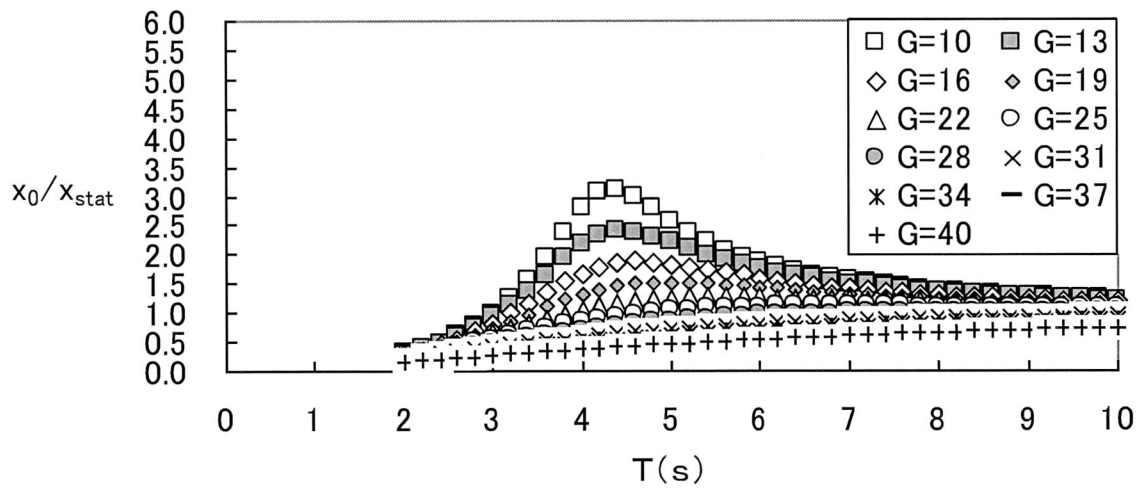
図-4.2 駆動プーリ半径と変位応答倍率の関係(波周期 4.2 秒)

## (2) ギア比の諸元の検討

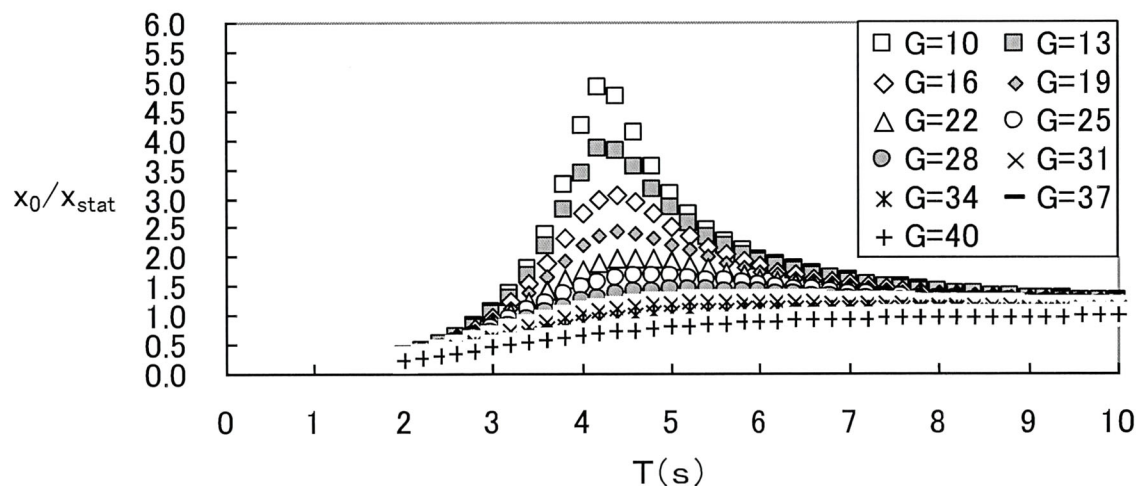
次に、水深による影響が小さいことから、駆動プーリ半径 0.2, 0.3, 0.4m の各々の場合についてギア比による変位応答倍率の変化を無限水深の条件で調べた。波周期 2 秒～10 秒の 0.2 秒間隔で算出し、ギア比を 10～40 で 3 刻みの計 10 パターンを算出した結果を縦軸に変位応答倍率、横軸に波周期をとり、図-4.3 に示す。



a) 駆動プーリ半径 0.2m の場合



b) 駆動プーリ半径 0.3m の場合



c) 駆動プーリ半径 0.4m の場合

図-4.3 波周期と変位応答倍率の関係 (駆動プーリ半径・ギア比別)

図より、ギア比が大きい場合、変位応答倍率が徐々に増加していき、一定値に漸近していくのに対し、ギア比が小さい場合、変位応答倍率は、波周期が 4.2 秒より短い範囲では波周期が長くなるにつ

れて急激に増加し、波周期 4.2 秒でピーク値をとり、その後減少しながら一定値に漸近していくことがわかる。また、ギア比が小さい方が変位応答倍率の値が大きくなっている。図-4.3a)の駆動プーリの半径が 0.2m の場合にはどのギア比も変位応答倍率のピーク値がわかりづらいが、前項でも述べたように駆動プーリの半径が 0.2m のときは共振に伴う変位応答倍率の増大があまり見られず、変位応答倍率の値自体が小さい。また、この図から、駆動プーリの半径が小さい場合、共振の効果を得るためにはギア比を 10 より小さくしなければならないことがわかる。また、ここで検討したどのギア比を使用した場合でも周期 4.2 秒のときに共振の効果を得ることができる。

次に、ギア比により変位応答倍率がどのように変化するかを検討するために、波周期 4.2 秒の場合についてときの変位応答倍率を縦軸に、ギア比を横軸にとった図を図-4.4 に示す。

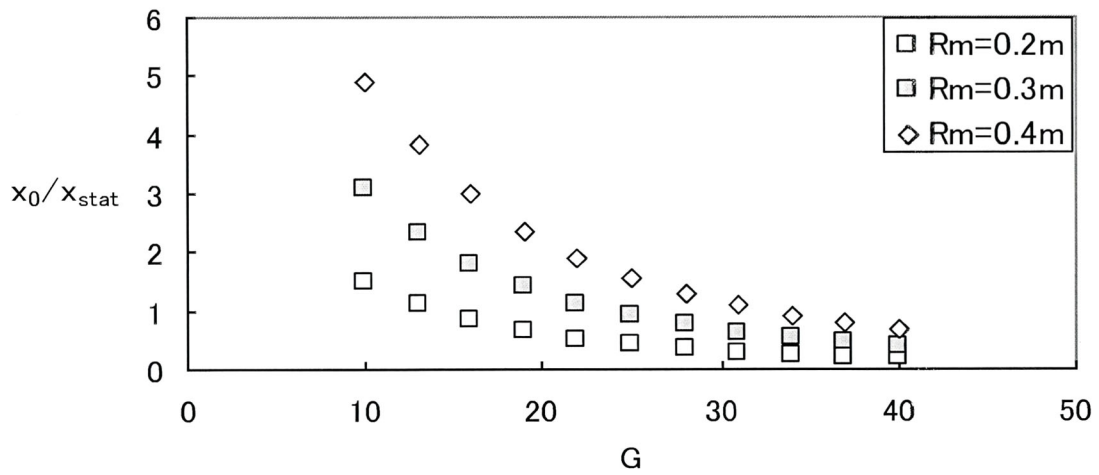


図-4.4 無限水深の場合のギア比と変位応答倍率の関係 (T=4.2 秒)

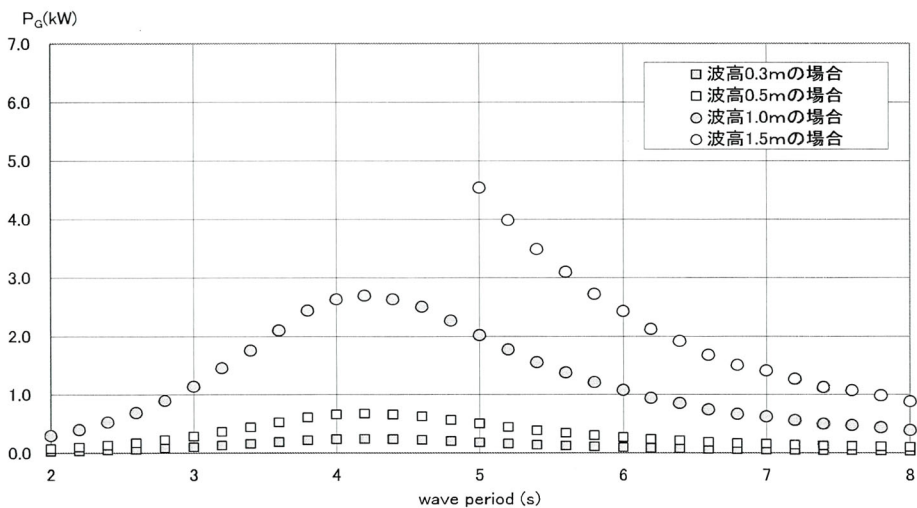
図より、駆動プーリの半径が 0.1m より大きくなると変位応答倍率の値は約 2 倍になっていることがわかる。また、変位応答倍率はギア比の増加とともに、それに反比例に近い形で減少していることがわかる。ギア比が大きくなると変位応答倍率が小さくなることを考察する。式(25)においてギア比の増大により、減衰比 $\zeta$ の値が大きくなり、このため変位応答倍率が小さくなると考える。

### (3) 各波高による平均発生電力、ワイヤ張力およびトルク

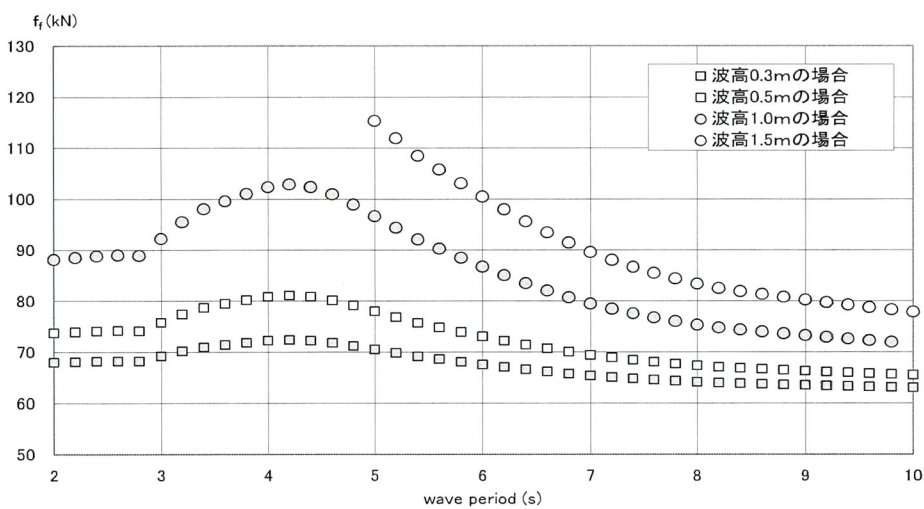
前項までの結果を踏まえ、駆動プーリの半径をある程度大きくし、ギア比を図-4.3 から決め、これを用いて力学モデルから種々の物理量を計算し検討する。まず、波高 0.3, 0.5, 1.0, 1.5m の条件で平均発生電力、最大ワイヤ張力、および最大トルクを検討する。駆動プーリとギア比は表-4.2 のようにした。縦軸に各物理量を取り、横軸に波周期 2 秒~10 秒を 0.2 刻みでとった。その結果を図-4.5 ~16 に示す。図の中でプロットがないものは、浮体が宙吊り、全没水状態などの状態が生じて装置が安全に稼働しないことを示している。

表-4.2 計算に用いる駆動プーリ半径、ギア比と波浪条件

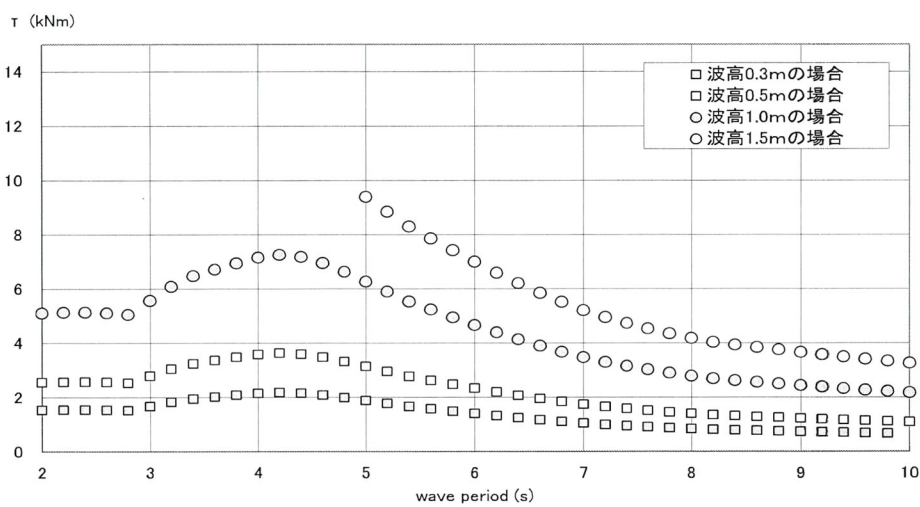
	$R_m$ (m)	$G$	波高 $H$ (m)	波周期 $T$ (s)
水深 $\infty$	0.3 , 0.4	16 , 25	0.3, 0.5, 1.0, 1.5	2~10 (0.2 刻み)
水深 10m	0.3 , 0.4	16 , 25	0.3, 0.5, 1.0, 1.5	2~10 (0.2 刻み)
水深 5m	0.3 , 0.4	16 , 25	0.3, 0.5, 1.0, 1.5	2~10 (0.2 刻み)



a) 平均発生電力

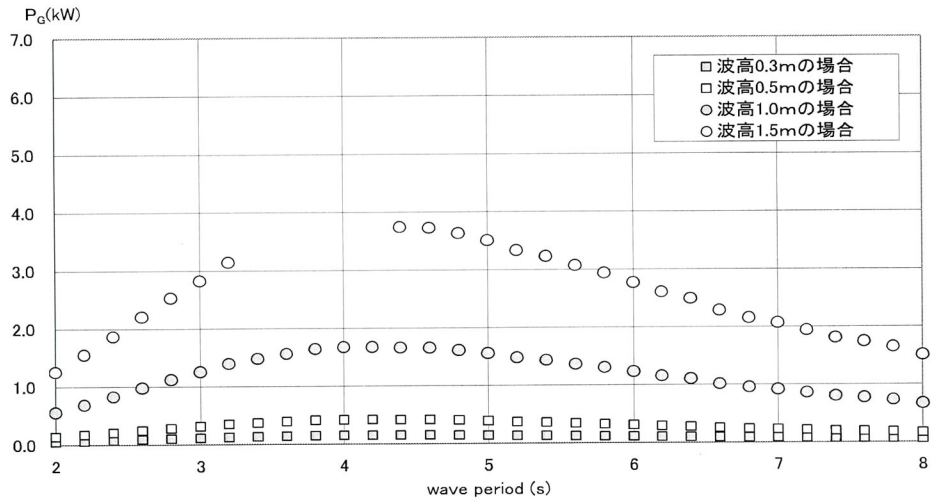


b) 最大ワイヤ張力

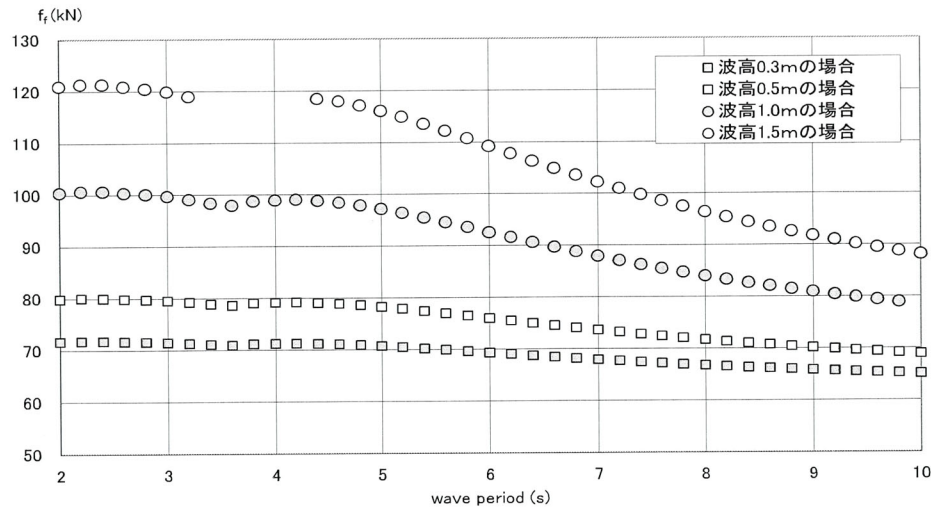


c) 最大トルク

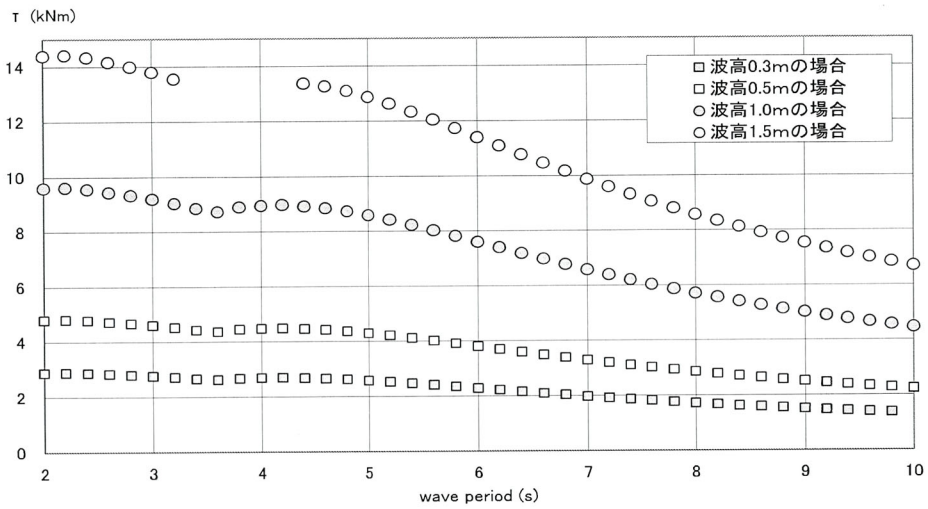
図-4.5 無限水深,  $R_m=0.3m$ ,  $G=16$  の場合の物理諸量



a) 平均発生電力

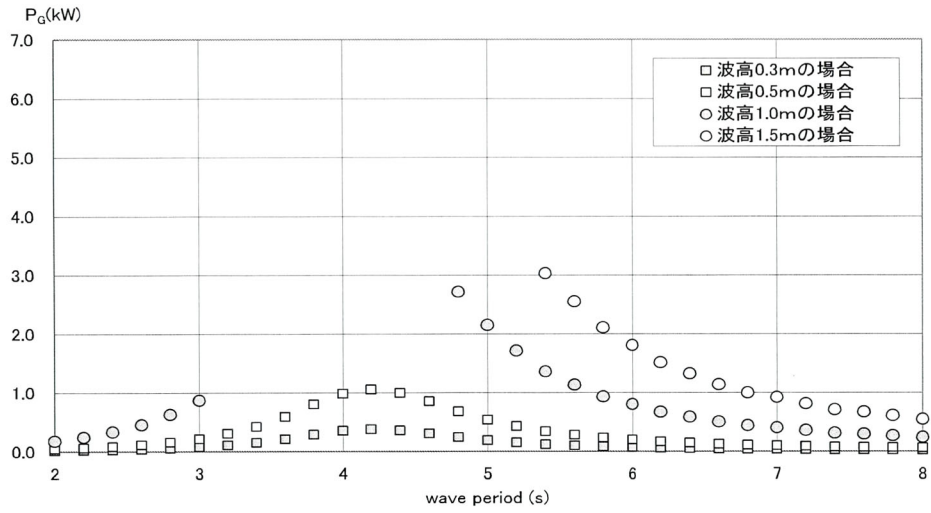


b) 最大ワイヤ張力

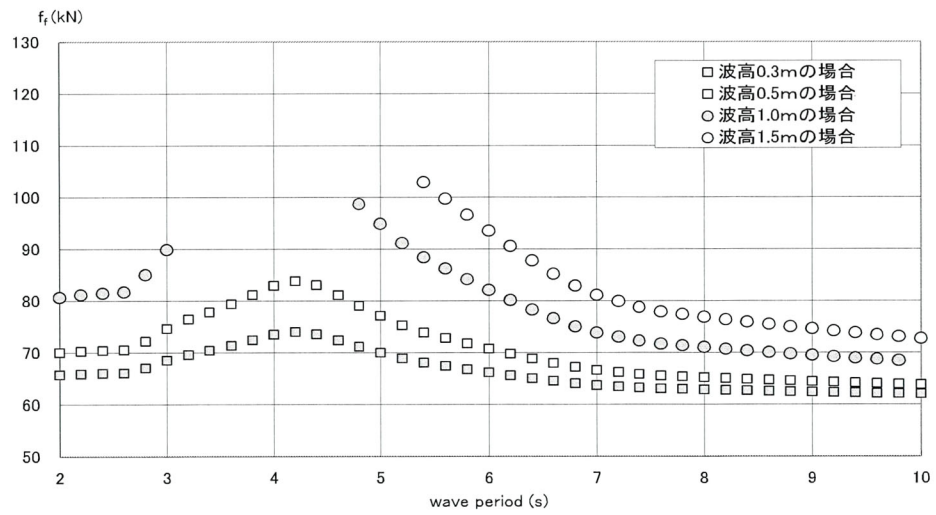


c) 最大トルク

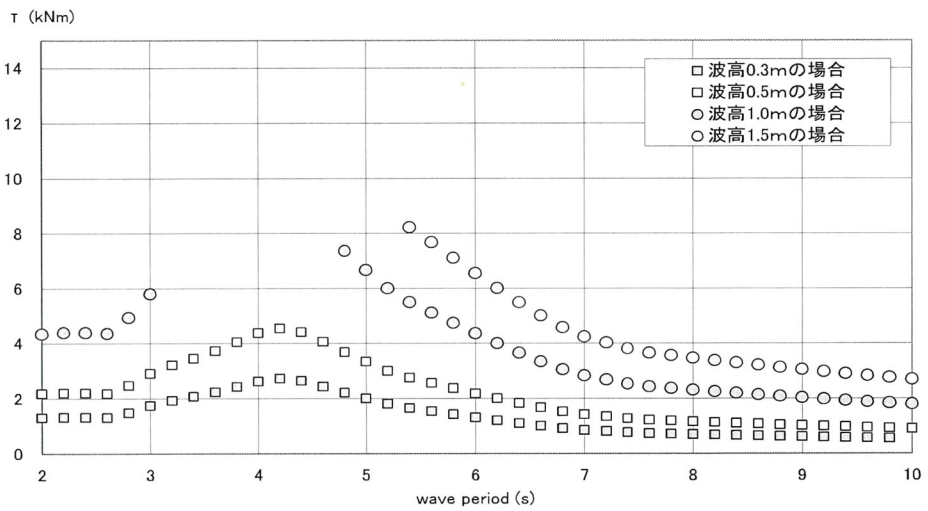
図-4.6 無限水深,  $R_m=0.3m$ ,  $G=25$  の場合の物理諸量



a) 平均発生電力

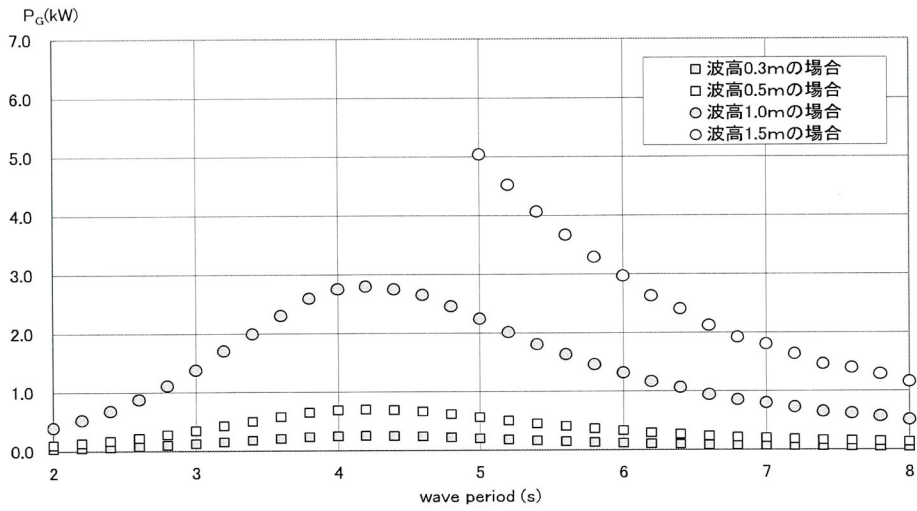


b) 最大ワイヤ張力

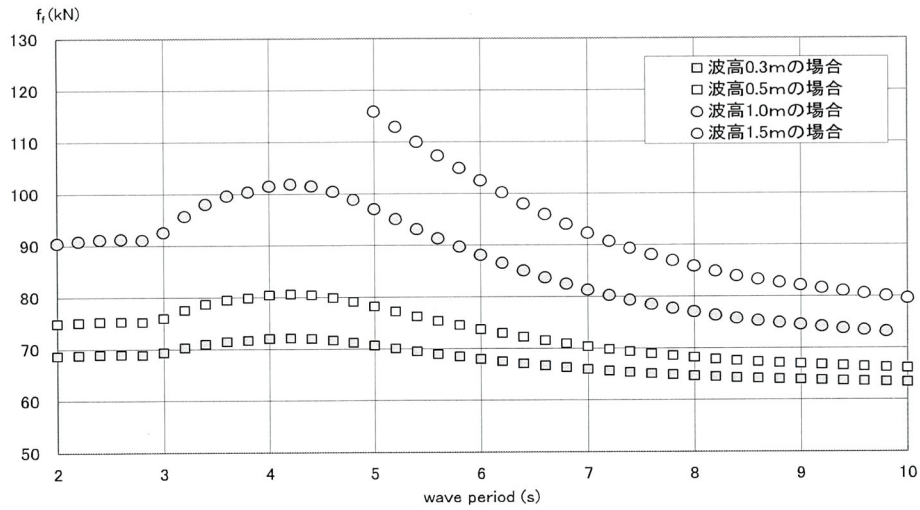


c) 最大トルク

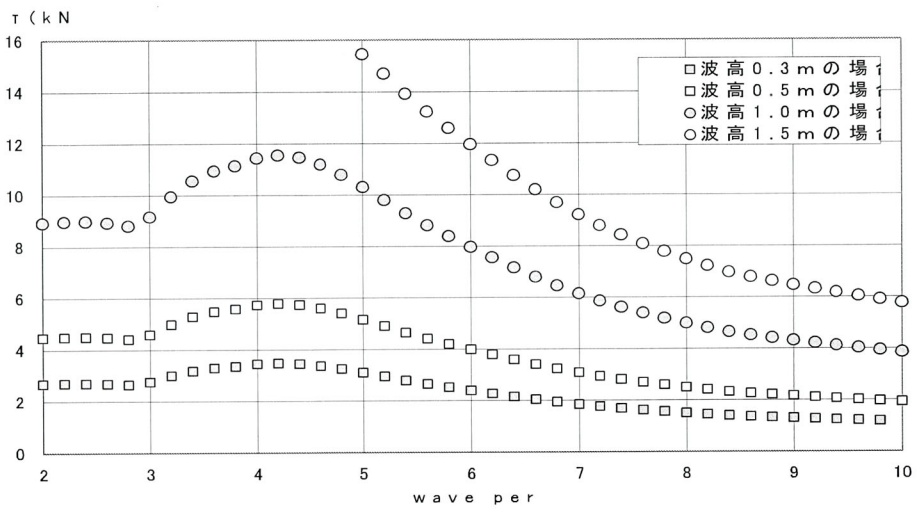
図-4.7 無限水深,  $R_m=0.4m$ ,  $G=16$  の場合の物理諸量



a) 平均発生電力



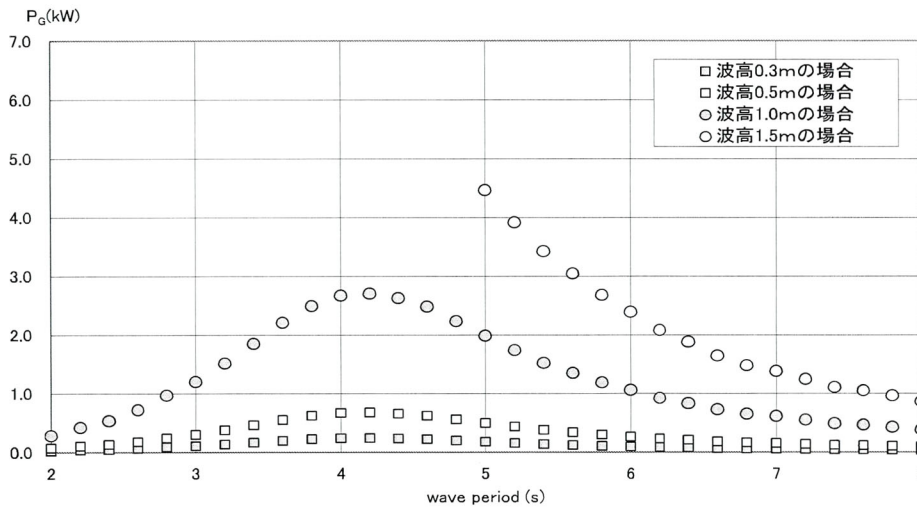
b) 最大ワイヤ張力



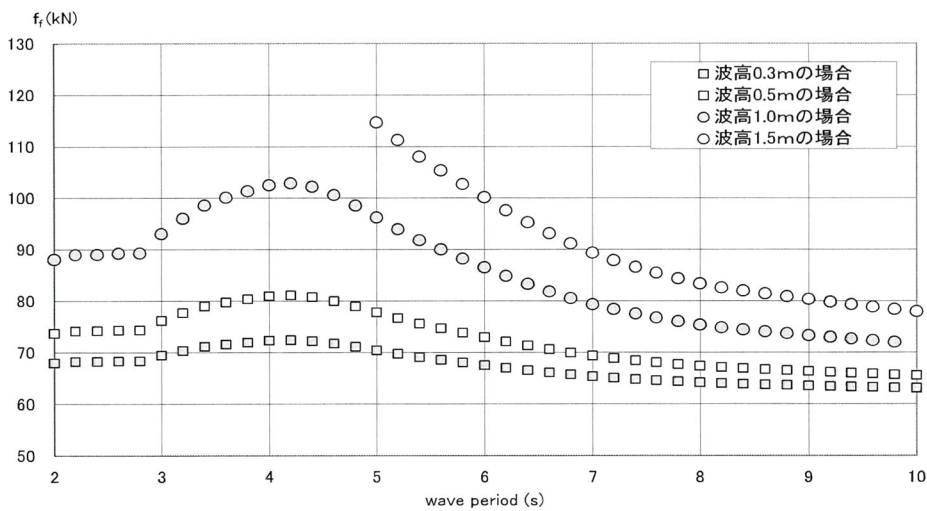
c) 最大トルク

図-4.8 無限水深,  $R_m=0.4m$ ,  $G=25$  の場合の物理諸量

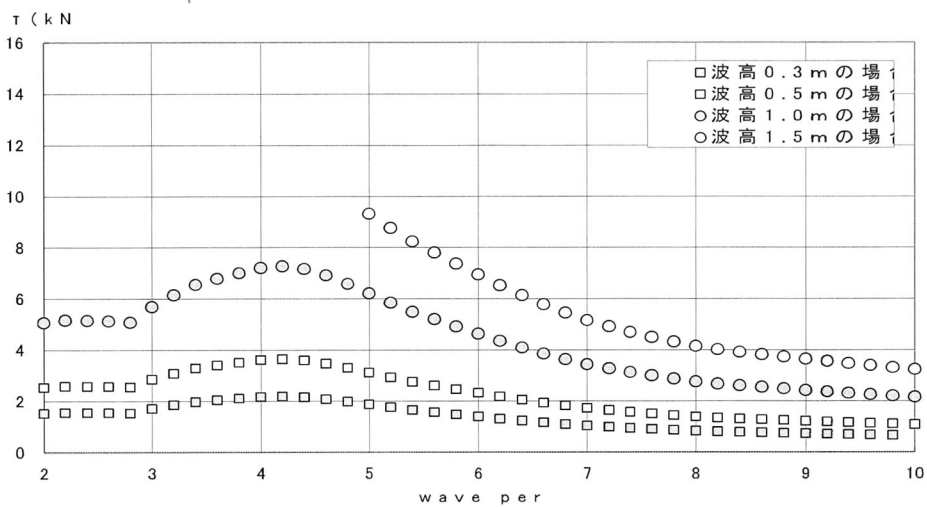




a) 平均発生電力

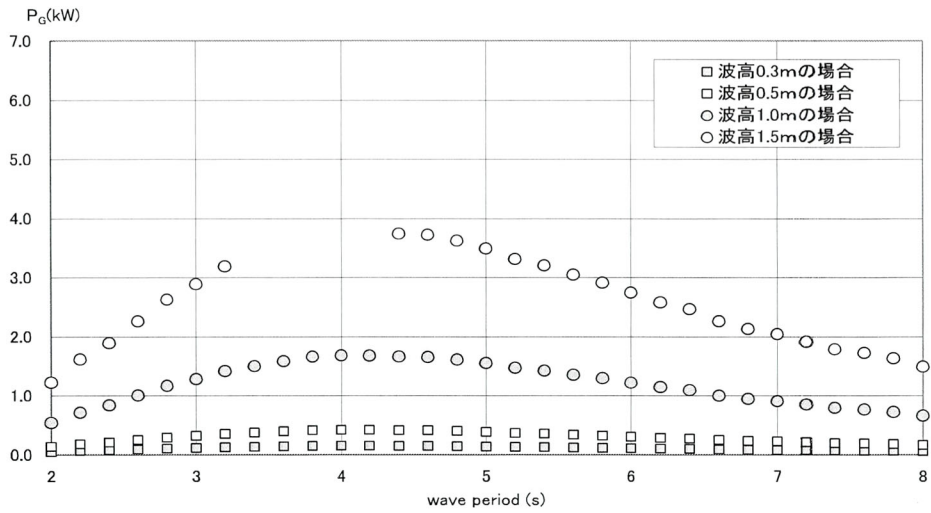


b) 最大ワイヤ張力

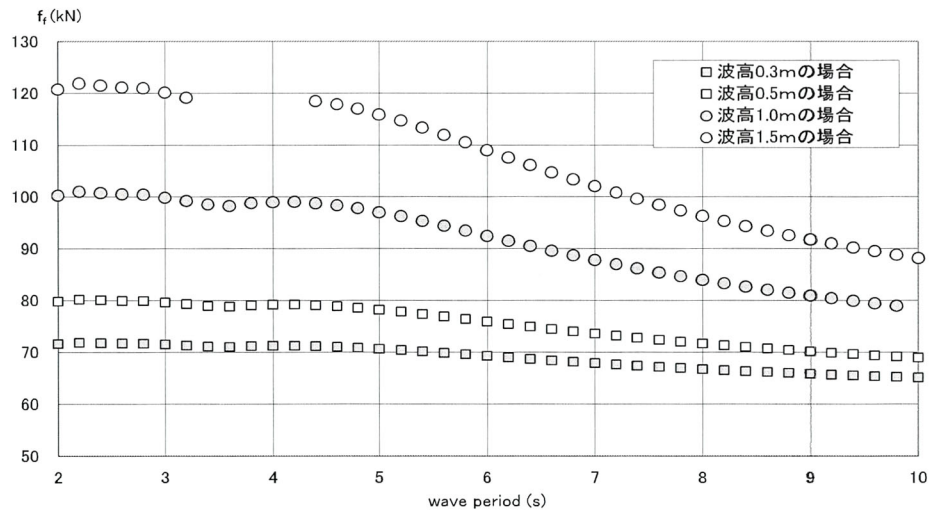


c) 最大トルク

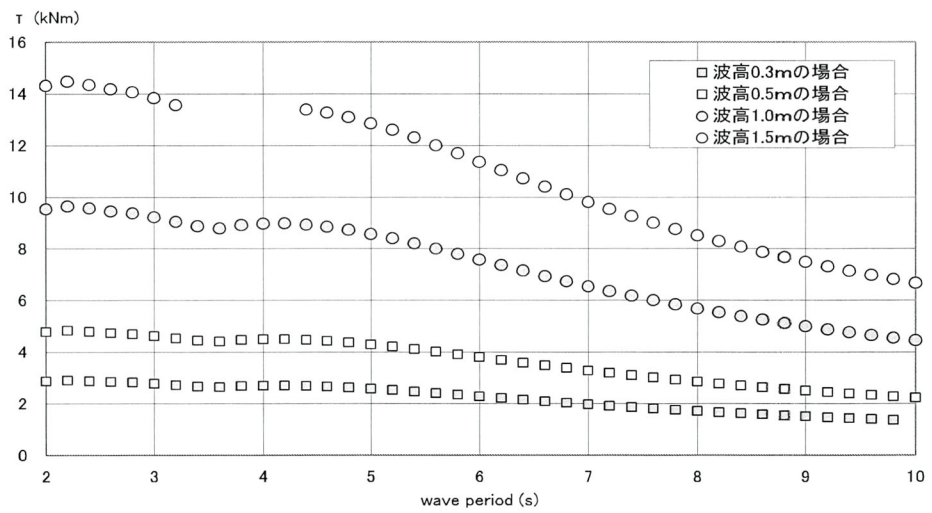
図-4.9 水深 10m,  $R_m=0.3m$ ,  $G=16$  の場合の物理諸量



a) 平均発生電力

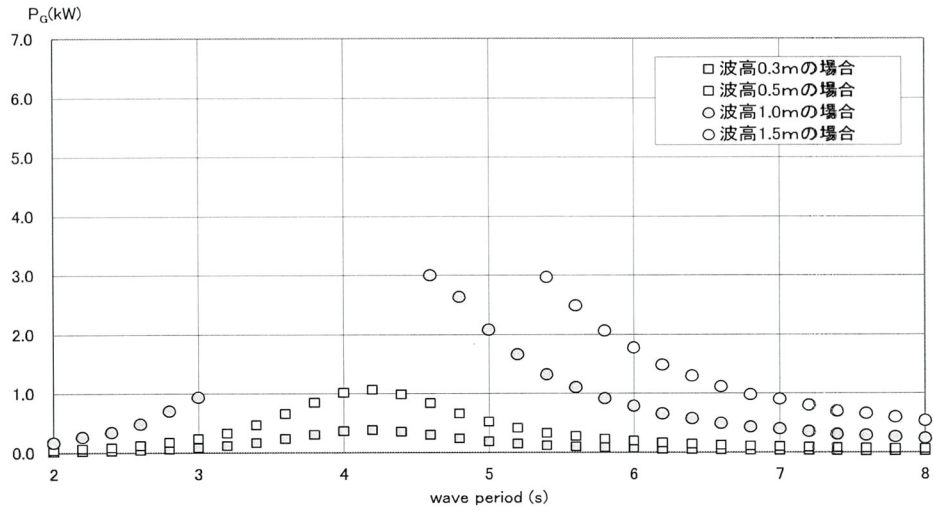


b) 最大ワイヤ張力

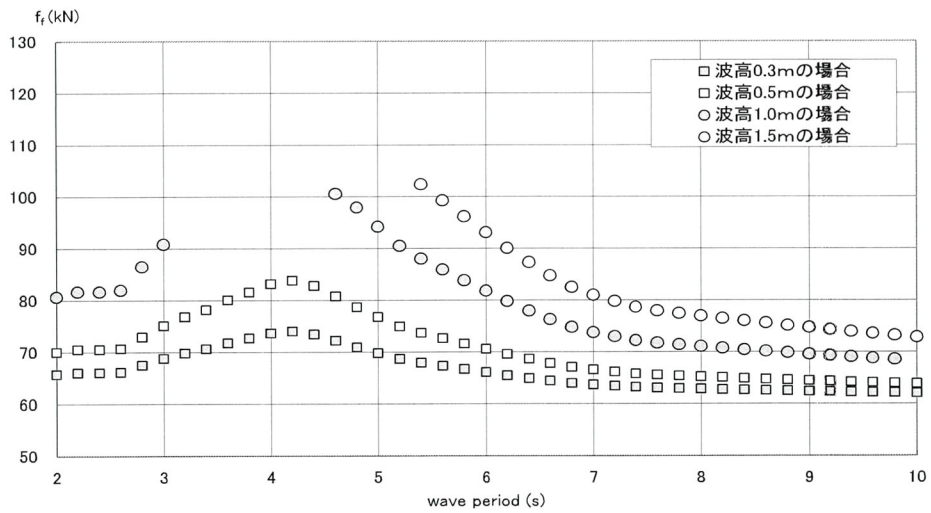


c) 最大トルク

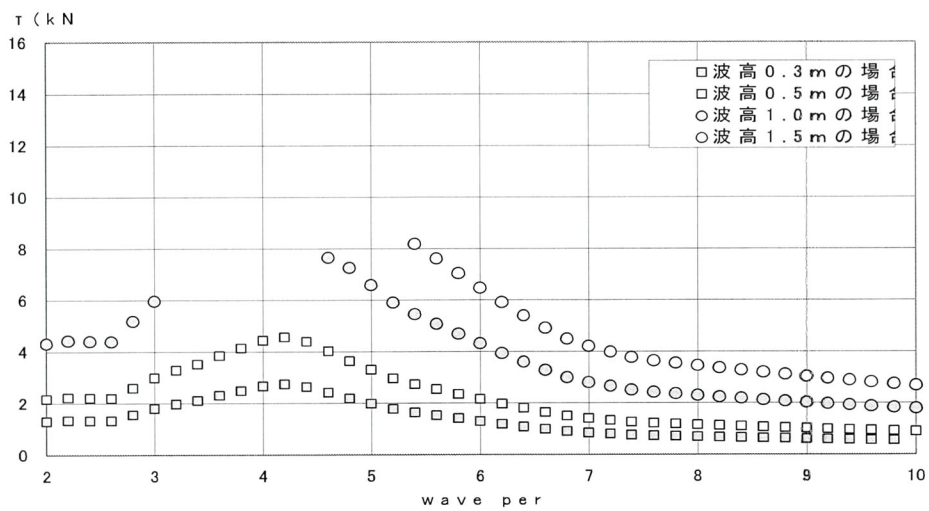
図-4.10 水深 10m,  $R_m=0.3m$ ,  $G=25$  の場合の物理諸量



a) 平均発生電力

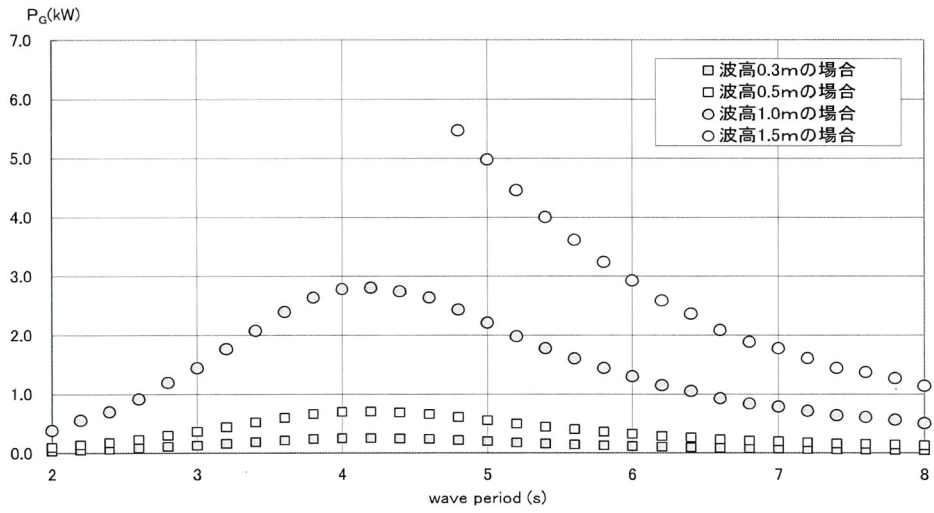


b) 最大ワイヤ張力

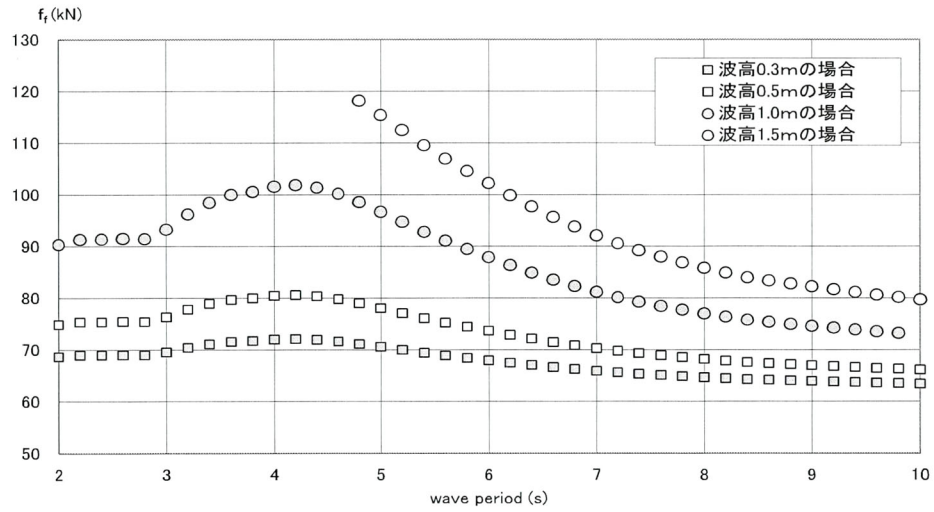


c) 最大トルク

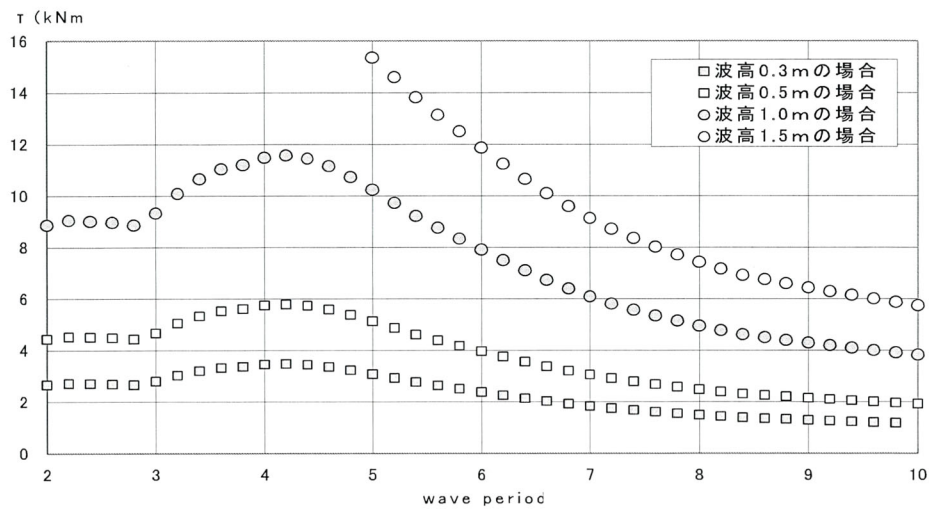
図-4.11 水深 10m,  $R_m=0.4m$ ,  $G=16$  の場合の物理諸量



a) 平均発生電力

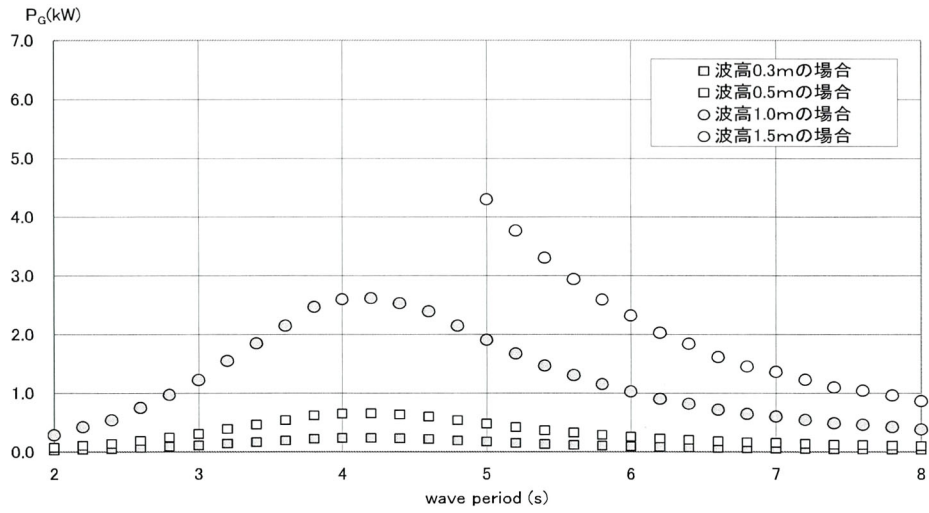


b) 最大ワイヤ張力

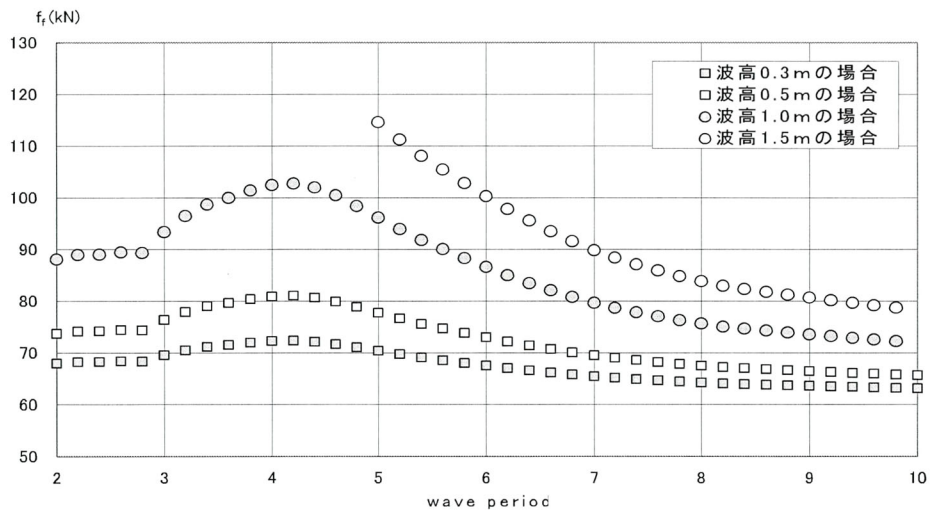


c) 最大トルク

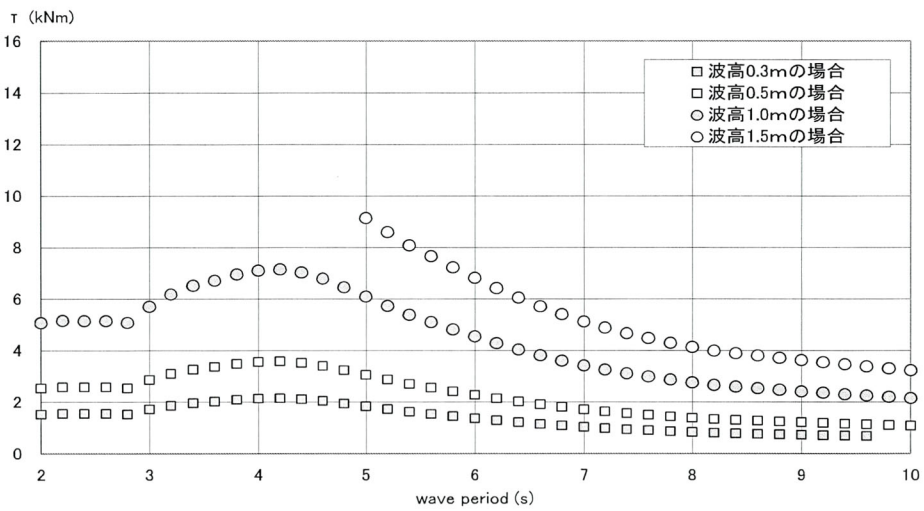
図-4.12 水深 10m,  $R_m=0.4m$ ,  $G=25$  の場合の物理諸量



a) 平均発生電力

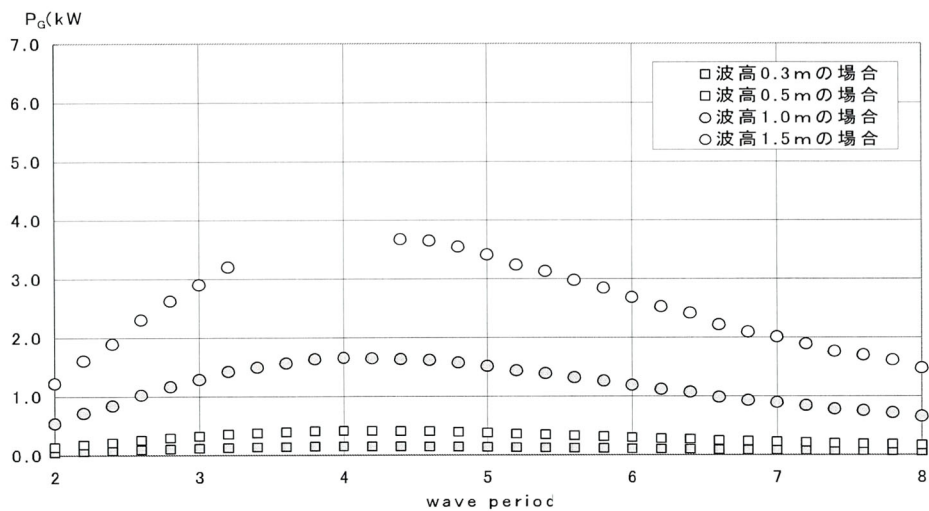


b) 最大ワイヤ張力

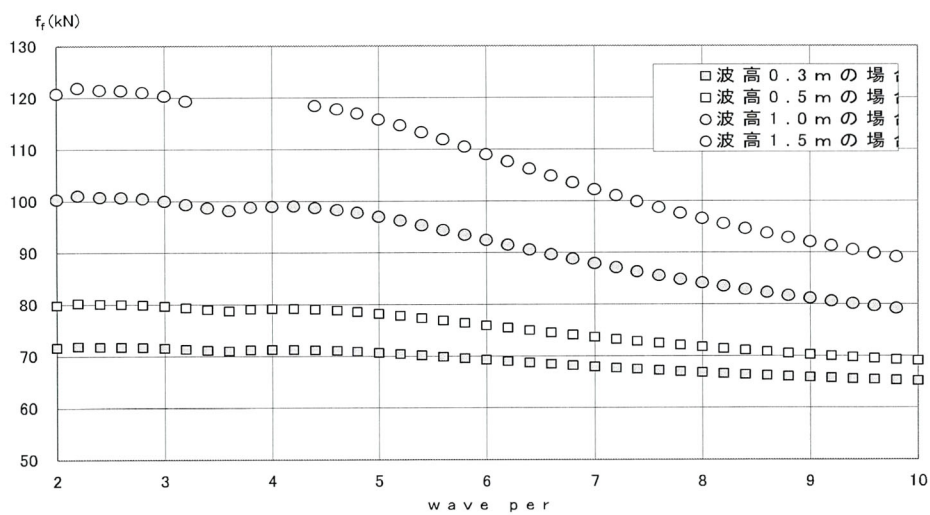


c) 最大トルク

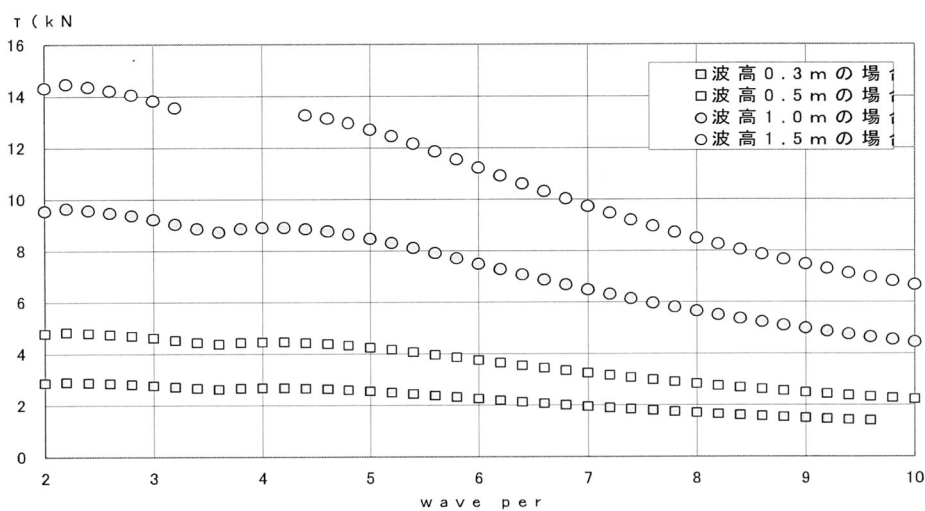
図-4.13 水深 5m,  $R_m=0.3m$ ,  $G=16$  の場合の物理諸量



a) 平均発生電力

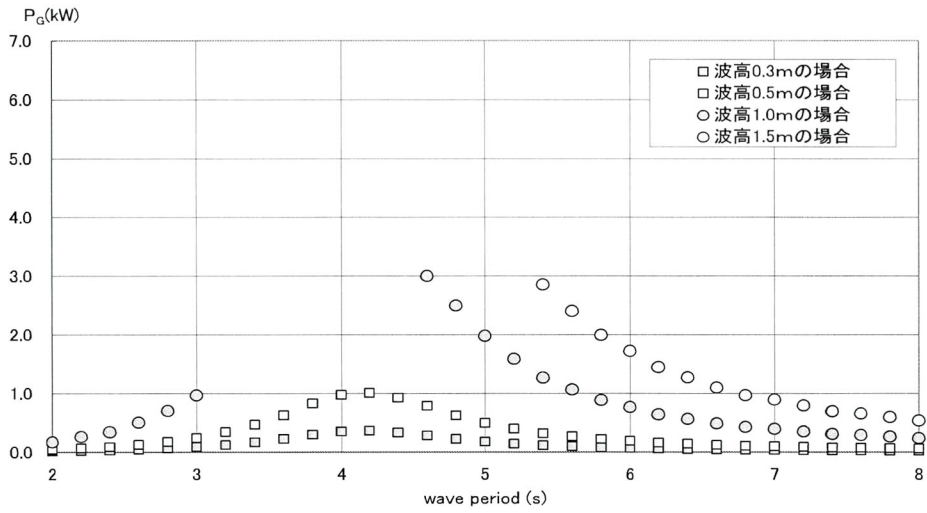


b) 最大ワイヤ張力

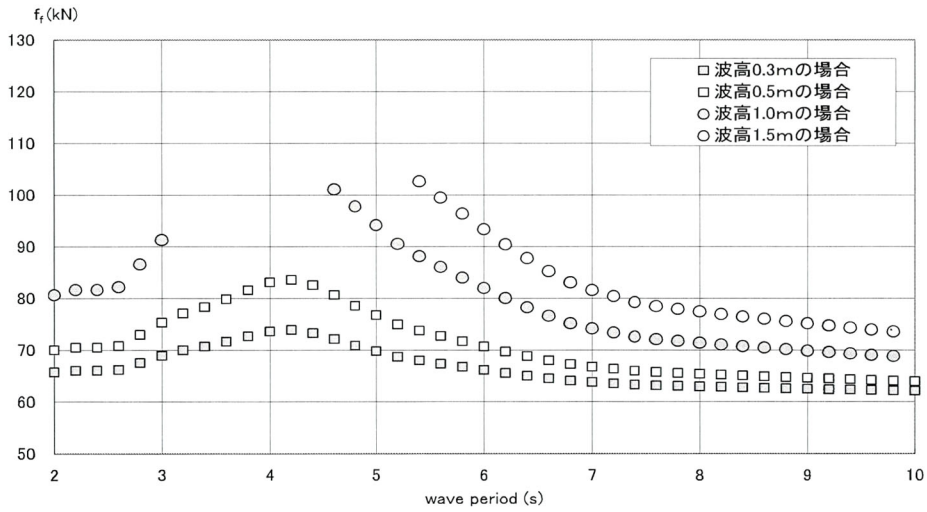


c) 最大トルク

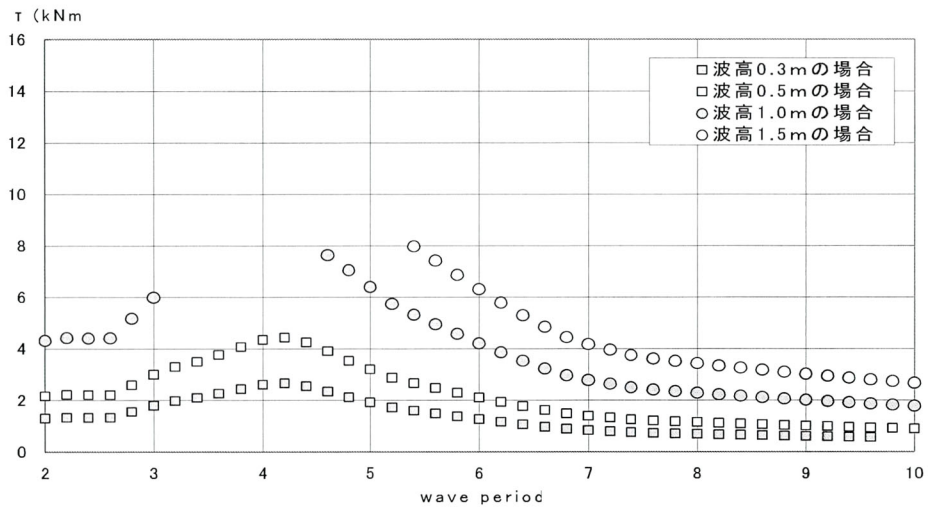
図-4.14 水深 5m,  $R_m=0.3m$ ,  $G=25$  の場合の物理諸量



a) 平均発生電力

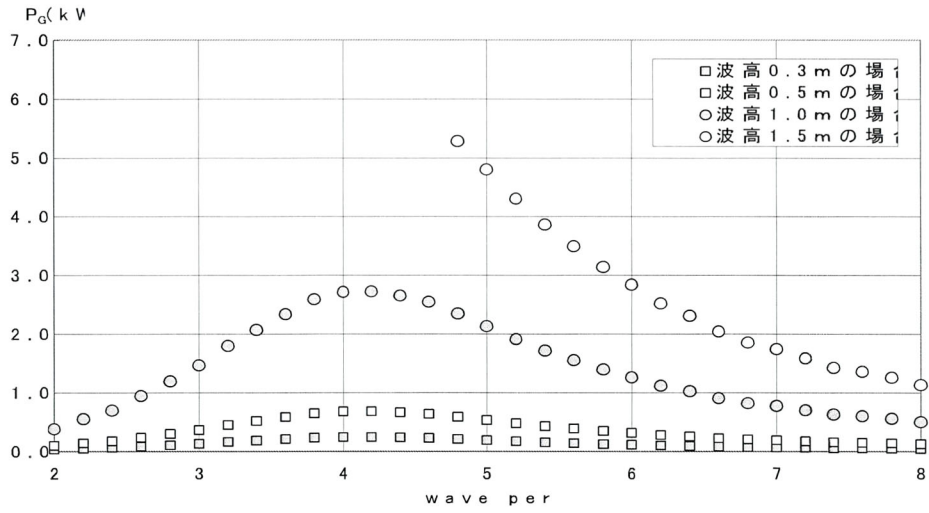


b) 最大ワイヤ張力

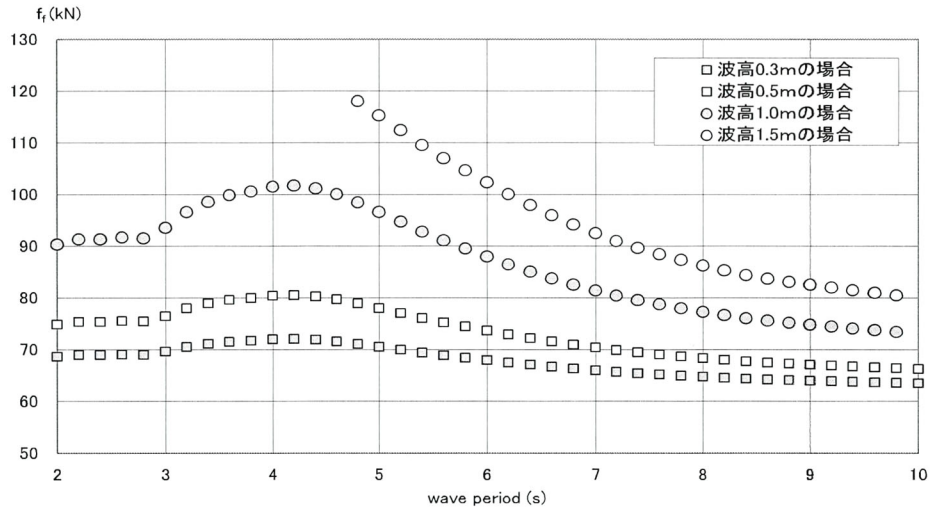


c) 最大トルク

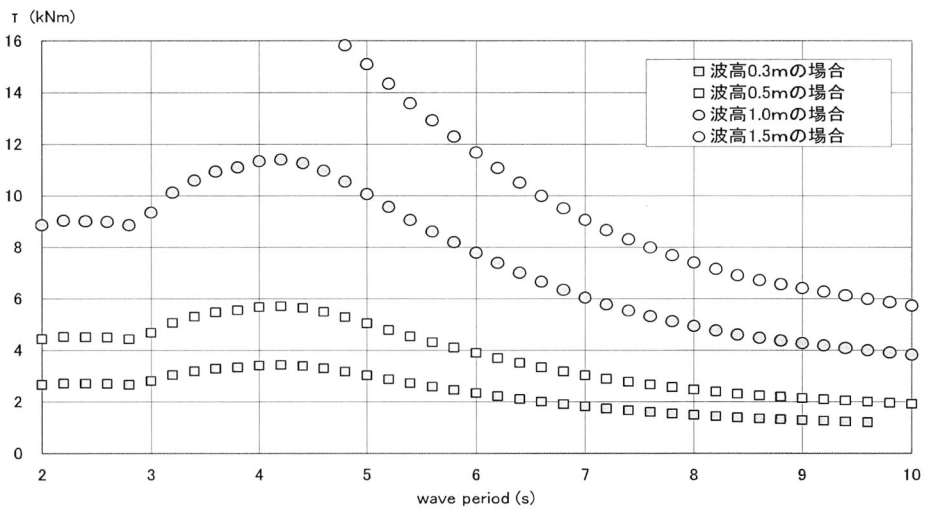
図-4.15 水深 5m,  $R_m=0.4m$ ,  $G=16$  の場合の物理諸量



a) 平均発生電力



b) 最大ワイヤ張力



c) 最大トルク

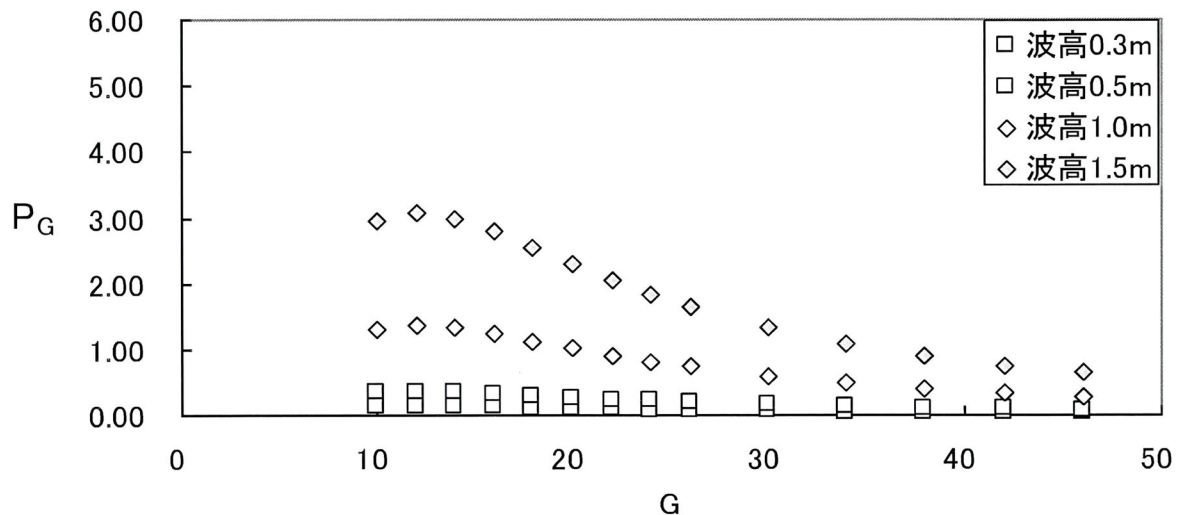
図-4.16 水深 5m,  $R_m=0.4m$ ,  $G=25$  の場合の物理諸量



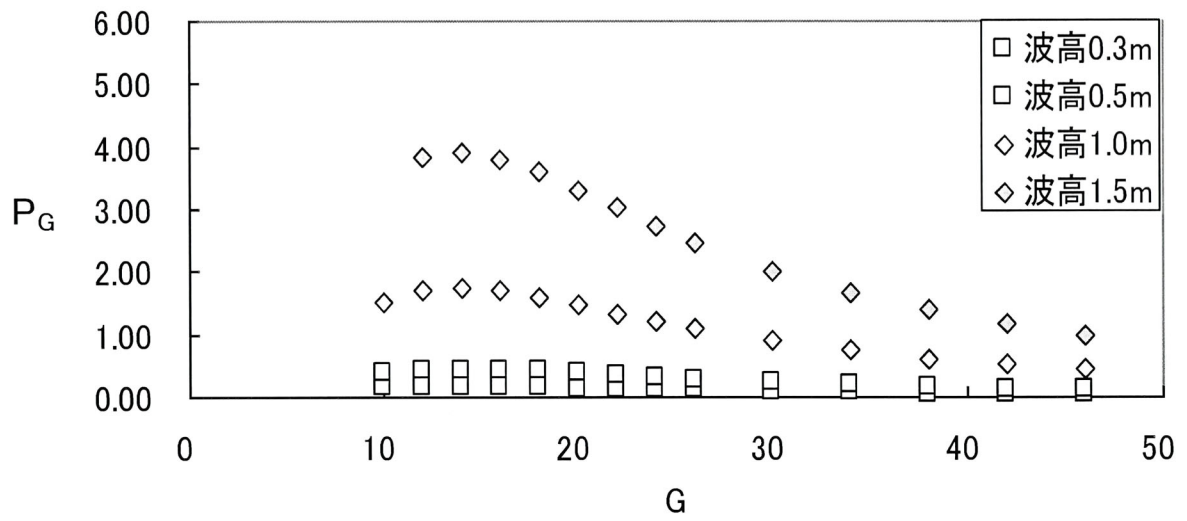
以上に示した図より、平均発生電力、最大ワイヤ張力、最大トルクの波周期による変化傾向はいずれも似通っていることがわかる。また、装置の共振周期に近い波周期では発生電力は大きいものの、波高が高い場合には浮体が宙吊り、全没水状態など、装置の安全稼働に支障をきたす状態が生じる。また、ギア比別に比較すると、駆動プーリ半径 0.4m の図を比較すると、 $G=16$  では波高が 1.0m のときは浮体の一部没水が保障されず、装置が安全に稼働しない周期があるのに対し、 $G=25$  では波高 1.0m でも浮体が一部没水を維持し、装置が安全に稼働していることがわかる。また、長周期の範囲で比較すると  $G=16$  と  $G=25$  のうち、 $G=25$  の図の方が大きい値になることがわかる。このような事態を避けるには式(26)の変位応答倍率  $x_0/x_{stat}$  を抑える必要がある。そのためには式(25)の減衰比  $\zeta$  を大きくすればよい。減衰比  $\zeta$  を大きくするには、造波減衰係数  $C$ 、ギア比  $G$ 、誘導電圧係数  $k_e$ 、トルク係数  $k_t$  を大きくし、負荷抵抗  $r$  を小さくすればよい。また、式(8)より発生電力を大きくするには、ギア比  $G$  と誘導電圧係数  $k_e$  を大きくし、負荷抵抗  $r$  を小さくすればよい。また、波高が高いと発生電力  $P_G$  が大きいのは、浮体変位が大きいことが考えられる。

#### (4) 装置の最適諸元の検討

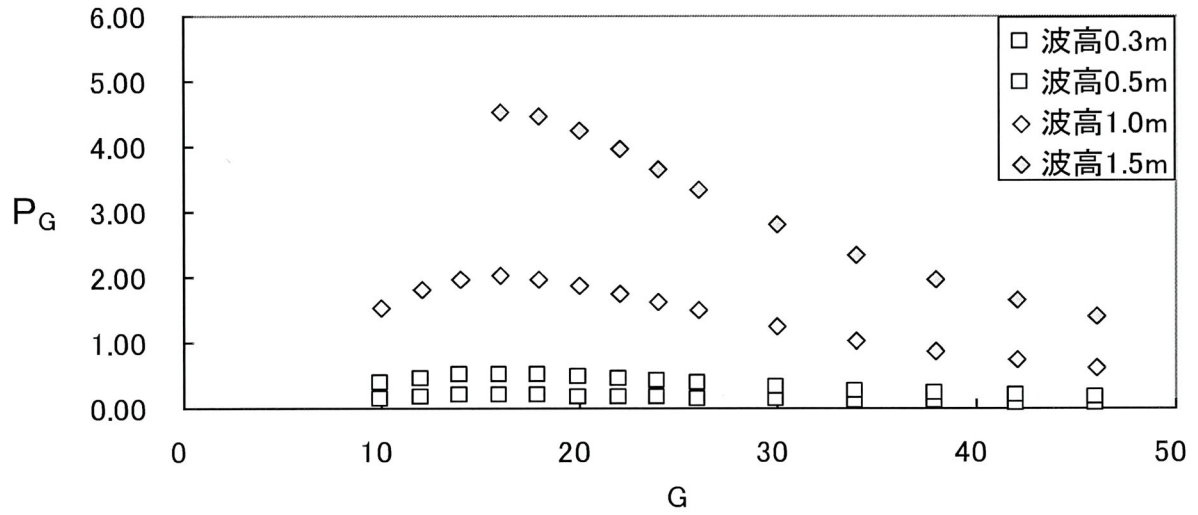
前項までに述べたように、装置の共振周期では浮体が宙吊りになったり、全没水になったりして装置が安全に稼働しない状況がある。このため、各駆動プーリ半径に応じた最適なギア比を検討する。その方法として、種々の駆動プーリ半径について、無限水深の条件で、種々の波高について発生電力を求める。そして縦軸に発生電力、横軸にギア比をとった図を作成し、その図から、電力を効率よく獲得できるギア比を決定する。ここで、駆動プーリの半径 0.20~0.45m を 0.50m 刻みでとって調べた。その図を図-4.17 に示す。



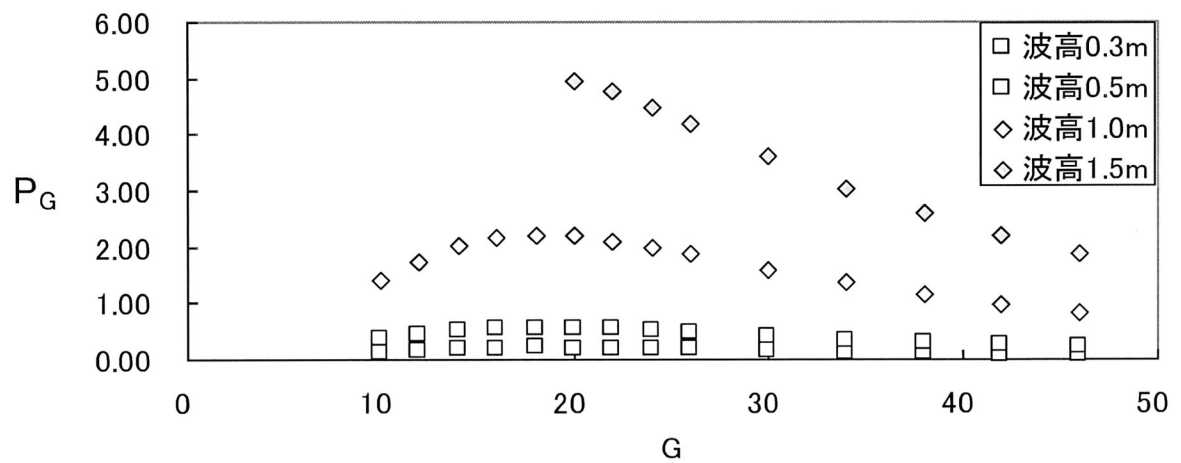
a) 駆動プーリ半径 0.20m の場合



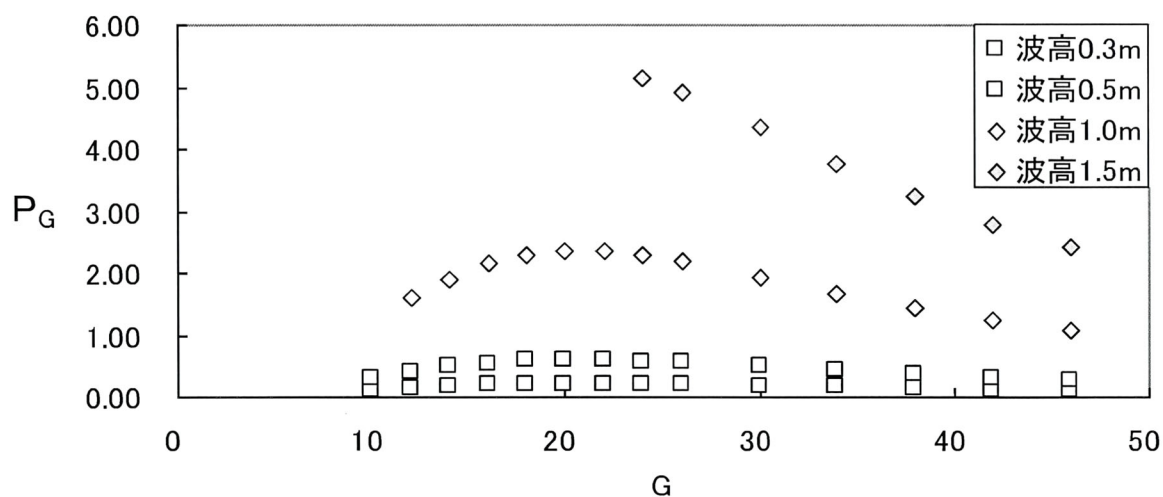
b) 駆動プーリ半径 0.25m の場合



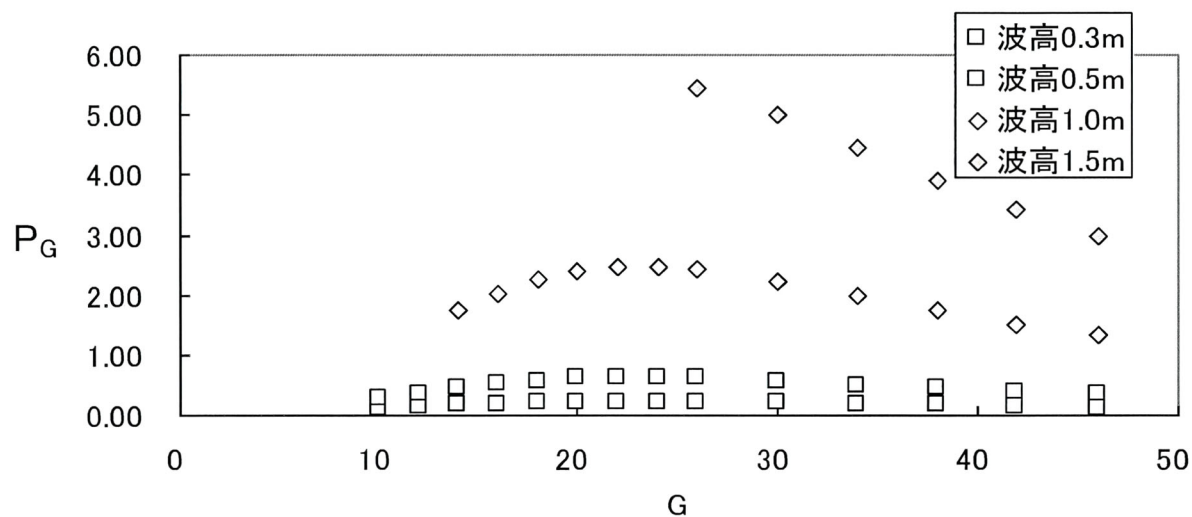
c) 駆動プーリ半径 0.30m の場合



d) 駆動プーリ半径 0.35m の場合



e) 駆動プーリ半径 0.40m の場合



f) 駆動プーリ半径 0.45m の場合

図-4.17 種々の波高におけるギア比と発生電力の関係

以上の図から、各駆動プーリ半径に関して浮体が一部没水を維持し、発生電力が大きい最適なギア比が存在する。その結果をまとめたものを表-4.3に示す。また、左縦軸に最適ギア比、右縦軸にそのときの変位応答倍率、横軸に駆動プーリ半径をとった図を図-4.18に示す。

表-4.3 各駆動プーリに対する最適ギア比

$R_m(m)$	最適G	変位応答倍率
0.2	12	1.343
0.25	14	1.625
0.3	16	1.839
0.35	20	1.789
0.4	24	1.740
0.45	26	1.859

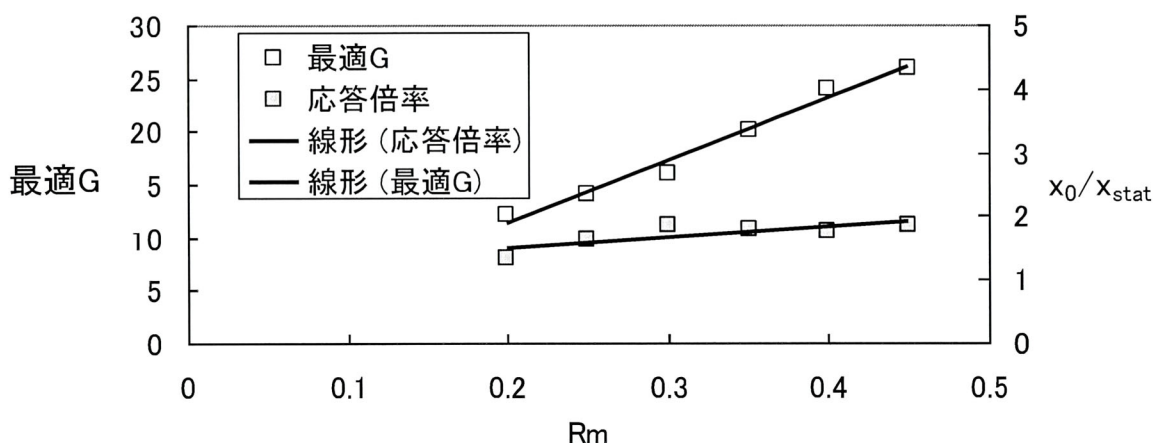


図-4.18 駆動プーリ半径と最適ギア比の関係

図-4.18 から、最適ギア比は駆動プーリの半径とともに増加するが、変位応答倍率は2程度の値で推移することがわかる。

以上で示したように、装置の最適化を行うには、まず設置予定海域の波高頻度から装置稼働の限界波高を決め、図-4.5~16 のような図を種々の波周期の場合について図を作成し、その図の発生電力のピーク値をとる装置諸元の変位応答倍率を計算すればよい。限界波高 1.5m 以下では、その変位応答倍率が2に近いものを採用すればよい。

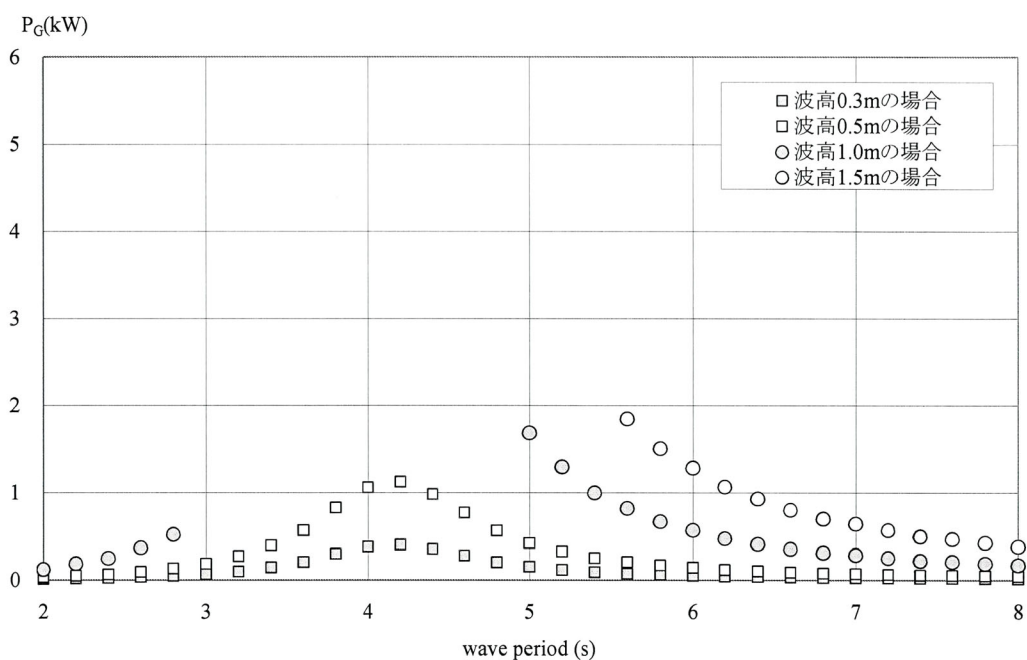
#### (5) ケーススタディー

前項までの結果を踏まえ、共振特性解析によって簡易的に駆動プーリ半径とギア比の諸元を決定する方法を示す。計算条件として、海域は水深 5m で限界波高 1.5m とした。その結果の比較として、海上設置型波力発電の諸元を後で適当に与えた装置諸元と前項の方法で決定した装置諸元の両方について算出された発生電力を比較し、改善の度合をみる。

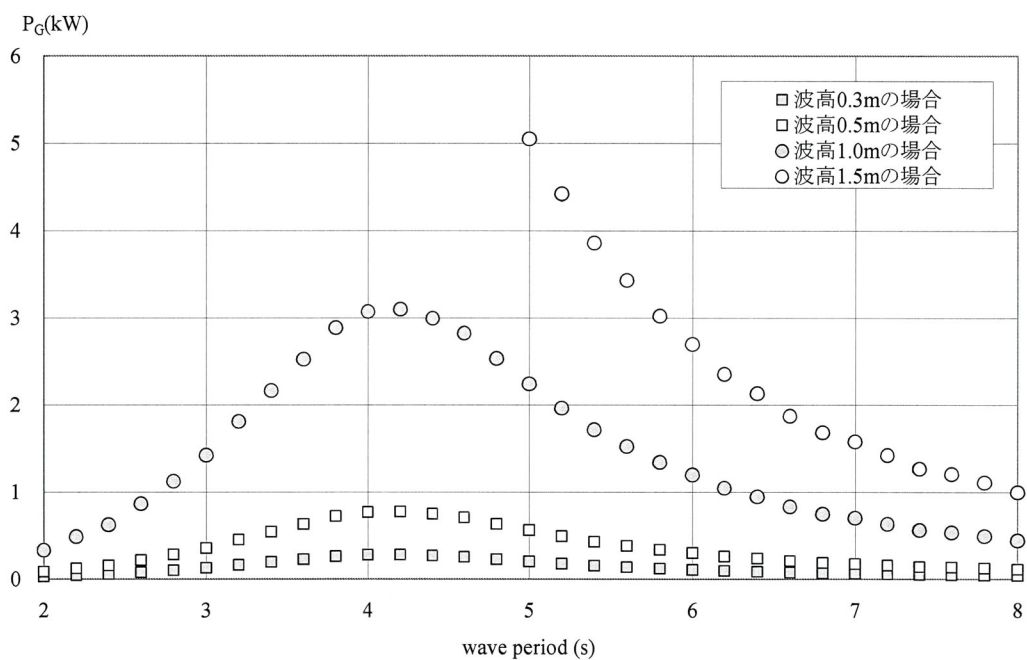
まず、海上設置型波力発電の対照諸元として第3章で適当に与えたものは表-2.3 と表-2.4 のようである。これらをここで再掲する。次に、駆動プーリ半径が 0.42m の場合の最適なギア比を図-4.23 から算出すると、ギア比  $G=24$  となった。このように、海上設置型波力発電の対照諸元として後で与えた装置のギア比は  $G=14$  であり、前項の方法で決定したギア比は  $G=24$  となった。これらを発生電力とエネルギー変換効率で評価する。

##### a) 発生電力による評価

図-4.19 は海上設置型波力発電の対照諸元として第3章で適当に与えた装置のギア比  $G=14$  の場合と、前項の方法で決定したギア比  $G=24$  の場合の波周期と発生電力の関係を示している。プロットがない条件は、浮体が一部没水状態を維持できず、宙吊りもしくは全没水状態が生じるケースである。これらの結果から、前項の方法でギア比を決定した場合が浮体の一部没水状態を維持しやすいことがわかる。特に、波高 1.0m の場合には、どの波周期に対しても浮体は一部没水状態を保ち、装置が好ましい状態で稼働することがわかる。



a) 諸元の決定を行わなかった場合



b) 諸元の決定を行った場合

図-4.20 波周期と発生電力の関係 (水深 5m)

b) エネルギー変換効率による評価

次に、エネルギー変換効率から評価する。エネルギー変換効率の式は発生電力を浮体に作用する波エネルギー  $W_E(W)$  で除したものとする。波エネルギーの式を式(27)に示す。

$$W_E = \frac{1}{8} \rho g H^2 \cdot C_G \cdot D_f \quad (27)$$

ここで、 $\rho$  は海水の密度 ( $\text{kg/m}^3$ )、 $g$  は重力加速度 ( $\text{m/s}^2$ )、 $H$  は波高 (m)、 $C_G$  は群速度 ( $\text{m/s}$ )、 $D_f$  は浮体直径 (m) である。

したがって、エネルギー変換効率  $E(\%)$  は式(28)のとおりである。

$$E = \frac{P_G}{W_E} \times 100 \quad (28)$$

以上、各波浪条件において、波エネルギー  $W_E(W)$  を算出し、エネルギー変換効率  $E$  を算出した。その結果を表-4.4 に示す。左から、波高、波周期、水深、浮体に作用する波エネルギー、海上設置型波力発電の諸元を後で適当に与えた装置諸元と前項の方法でギア比を決定した装置の発生電力とエネルギー変換効率を求め、最後の欄は前項の方法でギア比を決定した装置のエネルギー変換効率の向上の程度を示している。赤字で示した数値は、海上設置型波力発電の諸元を後で適当に与えた装置の方が前項の方法でギア比を決定した装置に比べて、エネルギー変換効率が良いことを示している。また空欄は、浮体が一部没水を維持していない状態を示しており、発生電力と同様、波高 1.0m 以上では、確実に前項の方法でギア比を決定した装置の方が有利であることがわかる。さらに詳細に評価するために、各波浪条件における装置諸元 (ギア比) の決定の有無による  $E$  を図によって比較したのが、図-4.21 である。

表-4.4 各波浪条件における装置諸元 (ギア比) の決定の有無による  $W_E$ 、 $P_G$  と  $E$  の比較

a) 波高 0.3m の場合

波高 H (m)	波周期 T (s)	水深 h (m)	フロートに作用する 波エネルギー W (kW)	駆動プーリ半径に対して最適なギア比の決定		駆動プーリ半径に対して最適なギア比の決定		エネルギー変換効率 の向上率 E <sub>有</sub> -E <sub>無</sub> (%)
				無しの発生電力 P <sub>G無</sub> (kW)	有りの発生電力 P <sub>G有</sub> (kW)	無しのエネルギー変換効率 E <sub>無</sub> (%)	有りのエネルギー変換効率 E <sub>有</sub> (%)	
0.3	2.0	5.0	0.53	0.01	0.03	1.89	5.66	3.77 ↑
0.3	2.2	5.0	0.59	0.02	0.04	3.39	6.78	3.39 ↑
0.3	2.4	5.0	0.64	0.02	0.06	3.13	9.38	6.25 ↑
0.3	2.6	5.0	0.69	0.03	0.08	4.35	11.59	7.25 ↑
0.3	2.8	5.0	0.75	0.05	0.10	6.67	13.33	6.67 ↑
0.3	3.0	5.0	0.80	0.07	0.13	8.75	16.25	7.50 ↑
0.3	3.2	5.0	0.85	0.10	0.16	11.76	18.82	7.06 ↑
0.3	3.4	5.0	0.90	0.14	0.19	15.56	21.11	5.56 ↑
0.3	3.6	5.0	0.96	0.20	0.23	20.83	23.96	3.13 ↑
0.3	3.8	5.0	1.01	0.30	0.26	29.70	25.74	3.96 ↓
0.3	4.0	5.0	1.06	0.38	0.28	35.85	26.42	9.43 ↓
0.3	4.2	5.0	1.11	0.40	0.28	36.04	25.23	10.81 ↓
0.3	4.4	5.0	1.16	0.35	0.27	30.17	23.28	6.90 ↓
0.3	4.6	5.0	1.20	0.28	0.25	23.33	20.83	2.50 ↓
0.3	4.8	5.0	1.25	0.20	0.23	16.00	18.40	2.40 ↑
0.3	5.0	5.0	1.30	0.15	0.20	11.54	15.38	3.85 ↑
0.3	5.2	5.0	1.34	0.12	0.18	8.96	13.43	4.48 ↑
0.3	5.4	5.0	1.39	0.09	0.15	6.47	10.79	4.32 ↑
0.3	5.6	5.0	1.43	0.07	0.14	4.90	9.79	4.90 ↑
0.3	5.8	5.0	1.47	0.06	0.12	4.08	8.16	4.08 ↑
0.3	6.0	5.0	1.51	0.05	0.11	3.31	7.28	3.97 ↑
0.3	6.2	5.0	1.56	0.04	0.09	2.56	5.77	3.21 ↑
0.3	6.4	5.0	1.60	0.04	0.09	2.50	5.63	3.13 ↑
0.3	6.6	5.0	1.63	0.03	0.07	1.84	4.29	2.45 ↑
0.3	6.8	5.0	1.67	0.03	0.07	1.80	4.19	2.40 ↑
0.3	7.0	5.0	1.71	0.03	0.06	1.75	3.51	1.75 ↑
0.3	7.2	5.0	1.75	0.02	0.06	1.14	3.43	2.29 ↑
0.3	7.4	5.0	1.79	0.02	0.05	1.12	2.79	1.68 ↑
0.3	7.6	5.0	1.82	0.02	0.05	1.10	2.75	1.65 ↑
0.3	7.8	5.0	1.86	0.02	0.04	1.08	2.39	1.31 ↑
0.3	8.0	5.0	1.90	0.02	0.04	1.05	2.10	1.05 ↑

b) 波高 0.5m の場合

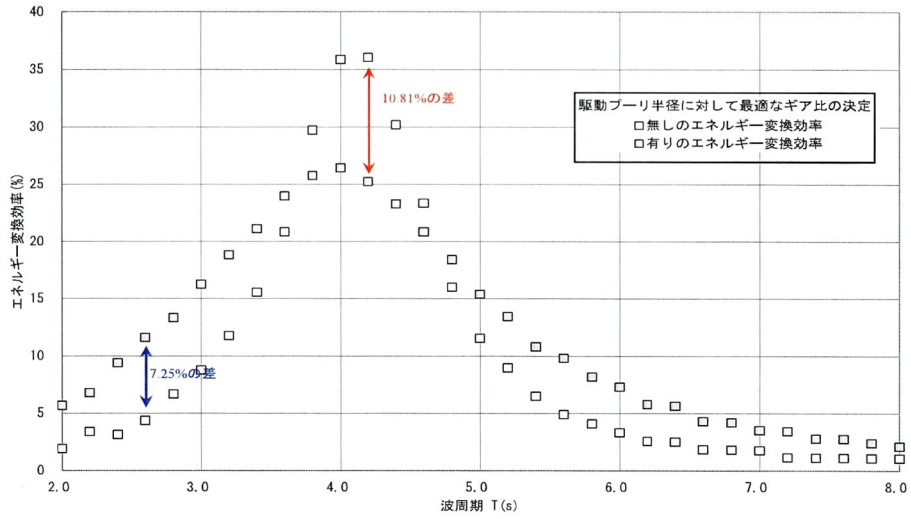
波高 H (m)	波周期 T (s)	水深 h (m)	フロートに作用する 波エネルギー W (kW)	駆動ブーリー半径に対して最適なギア比の決定		駆動ブーリー半径に対して最適なギア比の決定		エネルギー変換効率 の向上率 E <sub>有</sub> -E <sub>無</sub> (%)
				無しの発生電力 P <sub>0無</sub> (kW)	有りの発生電力 P <sub>0有</sub> (kW)	無しのエネルギー変換効率 E <sub>無</sub> (%)	有りのエネルギー変換効率 E <sub>有</sub> (%)	
0.5	2.0	5.0	1.48	0.03	0.08	2.03	5.41	3.38 ↑
0.5	2.2	5.0	1.63	0.05	0.12	3.07	7.36	4.29 ↑
0.5	2.4	5.0	1.77	0.06	0.16	3.39	9.04	5.65 ↑
0.5	2.6	5.0	1.92	0.09	0.22	4.69	11.46	6.77 ↑
0.5	2.8	5.0	2.07	0.13	0.28	6.28	13.53	7.25 ↑
0.5	3.0	5.0	2.22	0.18	0.36	8.11	16.22	8.11 ↑
0.5	3.2	5.0	2.37	0.27	0.45	11.39	18.99	7.59 ↑
0.5	3.4	5.0	2.51	0.39	0.54	15.54	21.51	5.98 ↑
0.5	3.6	5.0	2.66	0.57	0.63	21.43	23.68	2.26 ↑
0.5	3.8	5.0	2.80	0.83	0.72	29.64	25.71	3.93 ↓
0.5	4.0	5.0	2.94	1.06	0.77	36.05	26.19	9.86 ↓
0.5	4.2	5.0	3.08	1.12	0.77	36.36	25.00	11.36 ↓
0.5	4.4	5.0	3.21	0.98	0.75	30.53	23.36	7.17 ↓
0.5	4.6	5.0	3.35	0.77	0.71	22.99	21.19	1.79 ↓
0.5	4.8	5.0	3.48	0.56	0.63	16.09	18.10	2.01 ↑
0.5	5.0	5.0	3.61	0.42	0.56	11.63	15.51	3.88 ↑
0.5	5.2	5.0	3.73	0.32	0.49	8.58	13.14	4.56 ↑
0.5	5.4	5.0	3.85	0.25	0.43	6.49	11.17	4.68 ↑
0.5	5.6	5.0	3.97	0.21	0.38	5.29	9.57	4.28 ↑
0.5	5.8	5.0	4.09	0.17	0.34	4.16	8.31	4.16 ↑
0.5	6.0	5.0	4.21	0.14	0.30	3.33	7.13	3.80 ↑
0.5	6.2	5.0	4.32	0.12	0.26	2.78	6.02	3.24 ↑
0.5	6.4	5.0	4.43	0.10	0.24	2.26	5.42	3.16 ↑
0.5	6.6	5.0	4.54	0.09	0.21	1.98	4.63	2.64 ↑
0.5	6.8	5.0	4.65	0.08	0.19	1.72	4.09	2.37 ↑
0.5	7.0	5.0	4.76	0.07	0.18	1.47	3.78	2.31 ↑
0.5	7.2	5.0	4.86	0.06	0.16	1.23	3.29	2.06 ↑
0.5	7.4	5.0	4.96	0.06	0.14	1.21	2.82	1.61 ↑
0.5	7.6	5.0	5.07	0.05	0.13	0.99	2.56	1.58 ↑
0.5	7.8	5.0	5.17	0.05	0.12	0.97	2.39	1.42 ↑
0.5	8.0	5.0	5.27	0.04	0.11	0.76	2.11	1.35 ↑

c) 波高 1.0m の場合

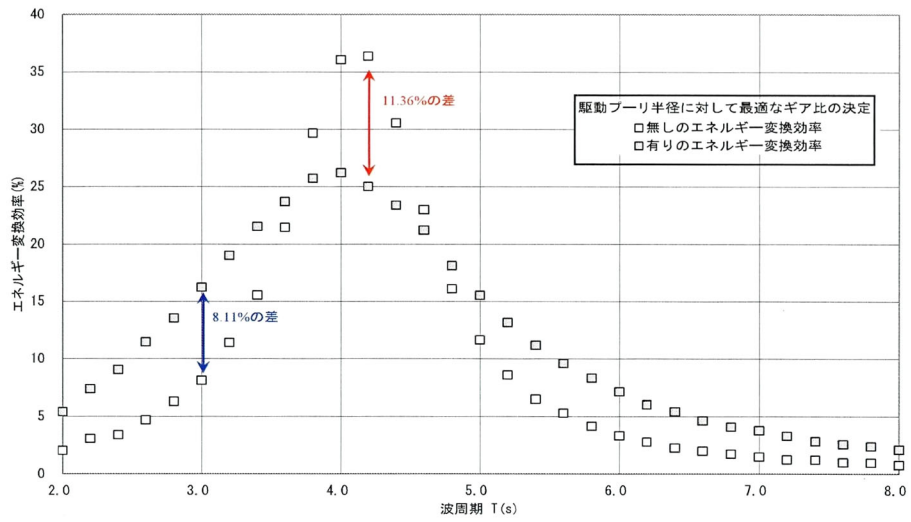
波高 H (m)	波周期 T (s)	水深 h (m)	フロートに作用する 波エネルギー W (kW)	駆動ブーリー半径に対して最適なギア比の決定		駆動ブーリー半径に対して最適なギア比の決定		エネルギー変換効率 の向上率 E <sub>有</sub> -E <sub>無</sub> (%)
				無しの発生電力 P <sub>0無</sub> (kW)	有りの発生電力 P <sub>0有</sub> (kW)	無しのエネルギー変換効率 E <sub>無</sub> (%)	有りのエネルギー変換効率 E <sub>有</sub> (%)	
1.0	2.0	5.0	5.92	0.12	0.33	2.03	5.57	3.55 ↑
1.0	2.2	5.0	6.51	0.19	0.49	2.92	7.53	4.61 ↑
1.0	2.4	5.0	7.10	0.25	0.63	3.52	8.87	5.35 ↑
1.0	2.6	5.0	7.69	0.37	0.87	4.81	11.31	6.50 ↑
1.0	2.8	5.0	8.28	0.52	1.13	6.28	13.65	7.37 ↑
1.0	3.0	5.0	8.87		1.42		16.01	16.01 ↑
1.0	3.2	5.0	9.46		1.81		19.13	19.13 ↑
1.0	3.4	5.0	10.04		2.17		21.61	21.61 ↑
1.0	3.6	5.0	10.62		2.53		23.82	23.82 ↑
1.0	3.8	5.0	11.20		2.89		25.80	25.80 ↑
1.0	4.0	5.0	11.76		3.07		26.11	26.11 ↑
1.0	4.2	5.0	12.31		3.10		25.18	25.18 ↑
1.0	4.4	5.0	12.86		2.99		23.25	23.25 ↑
1.0	4.6	5.0	13.39		2.82		21.06	21.06 ↑
1.0	4.8	5.0	13.91		2.53		18.19	18.19 ↑
1.0	5.0	5.0	14.42	1.68	2.24	11.65	15.53	3.88 ↑
1.0	5.2	5.0	14.92	1.30	1.96	8.71	13.14	4.42 ↑
1.0	5.4	5.0	15.41	1.00	1.72	6.49	11.16	4.67 ↑
1.0	5.6	5.0	15.89	0.82	1.53	5.16	9.63	4.47 ↑
1.0	5.8	5.0	16.36	0.67	1.34	4.10	8.19	4.10 ↑
1.0	6.0	5.0	16.83	0.57	1.20	3.39	7.13	3.74 ↑
1.0	6.2	5.0	17.28	0.47	1.05	2.72	6.08	3.36 ↑
1.0	6.4	5.0	17.73	0.41	0.95	2.31	5.36	3.05 ↑
1.0	6.6	5.0	18.17	0.36	0.83	1.98	4.57	2.59 ↑
1.0	6.8	5.0	18.60	0.31	0.75	1.67	4.03	2.37 ↑
1.0	7.0	5.0	19.02	0.29	0.70	1.52	3.68	2.16 ↑
1.0	7.2	5.0	19.44	0.25	0.63	1.29	3.24	1.95 ↑
1.0	7.4	5.0	19.86	0.22	0.56	1.11	2.82	1.71 ↑
1.0	7.6	5.0	20.26	0.21	0.54	1.04	2.67	1.63 ↑
1.0	7.8	5.0	20.67	0.19	0.49	0.92	2.37	1.45 ↑
1.0	8.0	5.0	21.06	0.17	0.44	0.81	2.11	1.30 ↑

d) 波高 1.5m の場合

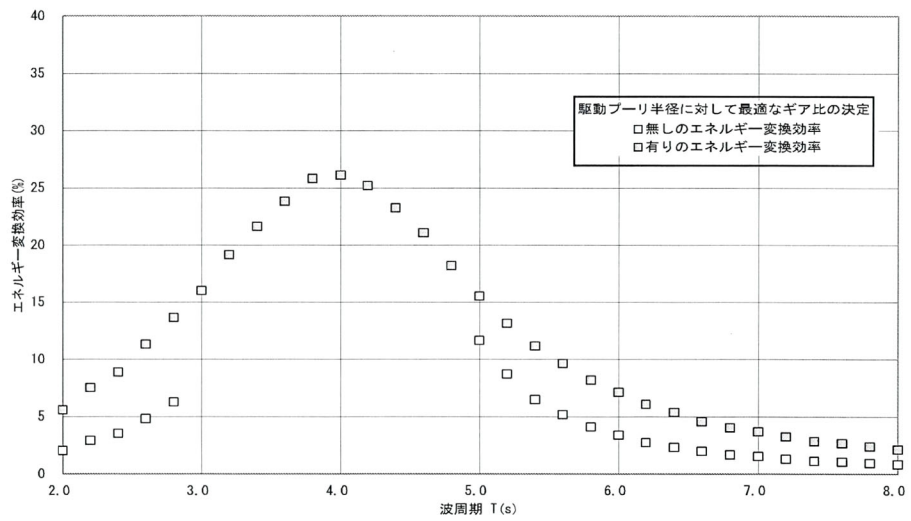
波高 H (m)	波周期 T (s)	水深 h (m)	フロートに作用する 波エネルギー W (kW)	駆動ブーリー半径に対して最適なギア比の決定		駆動ブーリー半径に対して最適なギア比の決定		エネルギー変換効率 の向上率 E <sub>有</sub> -E <sub>無</sub> (%)
				無しの発生電力 P <sub>0無</sub> (kW)	有りの発生電力 P <sub>0有</sub> (kW)	無しのエネルギー変換効率 E <sub>無</sub> (%)	有りのエネルギー変換効率 E <sub>有</sub> (%)	
1.0	2.0	5.0	13.32					3.55 ↑
1.0	2.2	5.0	14.64					
1.0	2.4	5.0	15.97					
1.0	2.6	5.0	17.30					
1.0	2.8	5.0	18.63					
1.0	3.0	5.0	19.96					
1.0	3.2	5.0	21.29					
1.0	3.4	5.0	22.60					
1.0	3.6	5.0	23.90					
1.0	3.8	5.0	25.19					
1.0	4.0	5.0	26.46					
1.0	4.2	5.0	27.70					
1.0	4.4	5.0	28.92					
1.0	4.6	5.0	30.12					
1.0	4.8	5.0	31.30					
1.0	5.0	5.0	32.45		5.05		15.56	15.56 ↑
1.0	5.2	5.0	33.57		4.42		13.17	13.17 ↑
1.0	5.4	5.0	34.68		3.86		11.13	11.13 ↑
1.0	5.6	5.0	35.76	1.85	3.43	5.17	9.59	4.42 ↑
1.0	5.8	5.0	36.82	1.51	3.02	4.10	8.20	4.10 ↑
1.0	6.0	5.0	37.86	1.28	2.70	3.38	7.13	3.75 ↑
1.0	6.2	5.0	38.88	1.07	2.36	2.75	6.07	3.32 ↑
1.0	6.4	5.0	39.88	0.93	2.14	2.33	5.37	3.03 ↑
1.0	6.6	5.0	40.87	0.80	1.87	1.96	4.58	2.62 ↑
1.0	6.8	5.0	41.84	0.70	1.69	1.67	4.04	2.37 ↑
1.0	7.0	5.0	42.80	0.64	1.58	1.50	3.69	2.20 ↑
1.0	7.2	5.0	43.74	0.57	1.42	1.30	3.25	1.94 ↑
1.0	7.4	5.0	44.67	0.50	1.27	1.12	2.84	1.72 ↑
1.0	7.6	5.0	45.59	0.47	1.21	1.03	2.65	1.62 ↑
1.0	7.8	5.0	46.50	0.43	1.11	0.92	2.39	1.46 ↑
1.0	8.0	5.0	47.39	0.38	1.00	0.80	2.11	1.31 ↑



a) 波高 0.3m の場合

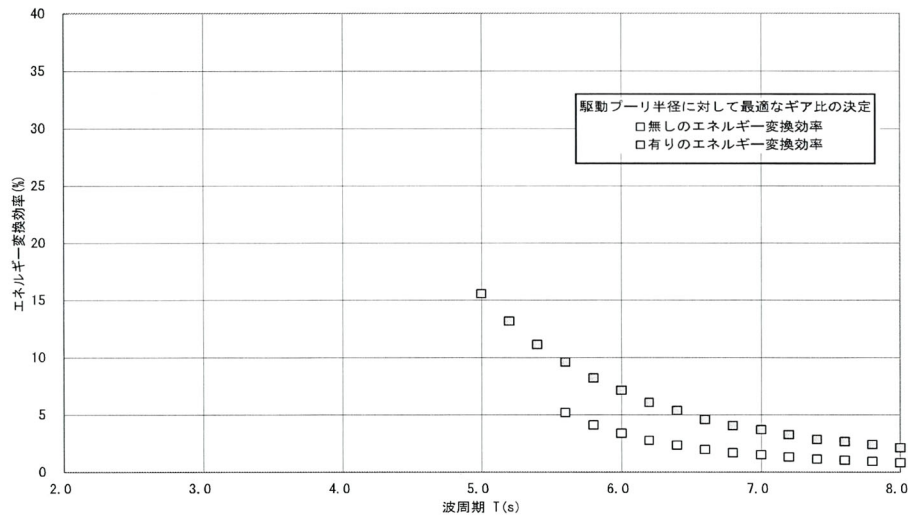


b) 波高 0.5m の場合



c) 波高 1.0m の場合





d) 波高 1.5m の場合

図-4.20 最適ギア比決定の有無によるエネルギー変換効率  $E$  の比較

以上に示した図より、共振周期領域では海上設置型波力発電の諸元を適当に与えた（第3章まで使用した）装置のギア比  $G=14$  の場合が、前項の方法で決定したギア比  $G=24$  の場合に比べてエネルギー変換効率は高いが、それ以外は後者の場合が高くなっている。波高 1.0m 以上では、後者の場合がどの波周期においても、エネルギー変換効率は高いことを示している。また波高 1.0m 以下では、共振周期領域において、エネルギー変換効率は 25% を超えることがわかる。

#### 4.3 結語

以上、本装置の高出力・高効率化を図るために、前章の共振解析の結果利用し、簡易的に本システムの諸元の決定方法を提示した。本章で得られた主要な知見は以下のようである。

1. 駆動プーリ半径  $R_m$  別に、各水深で変位応答倍率を調べた結果、駆動プーリ半径が大きい程、共振現象が顕著に見られること、変位応答倍率は水深によってあまり変化しないことがわかった。
2. 駆動プーリ半径を種々変化させて変位応答倍率を調べた結果、駆動プーリ半径が大きい程、変位応答倍率は大きいことがわかった。また、ギア比を変化させて変位応答倍率を調べた結果、ギア比が小さい程、変位応答倍率が大きいがわかった。また両者の結果から、ここで検討した諸元の装置では、システムの固有周期は 4.2 秒程度であり、これは駆動プーリ半径とギア比が変化しても変化しないことがわかった。
3. 発生電力、ワイヤ張力およびトルクを評価した結果、共振周期に近い周期では浮体が宙づりになったり、全没水になったりして装置が安全に稼働しないことがあり、変位応答倍率が大きすぎる装置諸元は採用できないことがわかった。
4. 種々の駆動プーリ半径に対して、浮体が一部没水状態を維持する条件で最適なギア比を決定した結果、限界波高が 1.5m の場合において、図-4.18 から、変位応答倍率が 2 に近いものを採用すると、装置が安全に稼働し、かつ大きい発生電力を獲得できることがわかった。
5. 前章までで海上設置型波力発電の装置諸元として与えたギア比と 4.1(4) 項の手法で決定したギア比で発生電力とエネルギー変換効率を求めた結果、4.1(4) 項でギア比の諸元を決定した場合で浮体が一部没水状態を維持し、かつ効率的に稼働することが確認された。特に、波

高 1.0m 以下では、共振周期に近い周期の領域において、エネルギー変換効率は 25%を超えることを確認した。

以上のことから、力学モデルのフル計算を行うことなく共振特性解析によって、効率的に装置諸元の最適化を行なうことがわかる。

#### 参考文献

- 1) 種浦圭輔, 羽田野袈裟義, 米山治男, 池上国広, 中野公彦, Pallav KOIRALA : 可動物体型波力発電装置の共振特性の検討, 土木学会論文集 B, Vol.66, No.2, pp.196-206.2010.
- 2) Kesayoshi Hadano, Keisuke Taneura, Takashi Saito, Kimihiko Nakano: Evaluation of energy obtained by float-type wave generation system, Proceeding.14<sup>th</sup> International Offshore and Polar Engineering Conference, Vol.1, pp. 246-252. CD ROM, 2004.
- 3) Kesayoshi Hadano, Keisuke Taneura, Makoto Watanabe, Takashi Saito, Kimihiko Nakano: Mechanics of the Float Type Wave Energy Conversion, Proceeding.16<sup>th</sup> International Offshore and Polar Engineering Conference, Vol.1, pp. 430-436. CD ROM, 2006.
- 4) 濱田朗久 : フロート・カウンターウェイトタイプ波力発電装置の力学検討, 平成 21 年度山口大学卒業論文, 2010.

## 第5章 結論

以上、本研究では、浮体・釣合錘式波力発電装置の設計に必要な資料を得ることを最終目的にして、この方式の力学検討を行った。

第1章では再生可能エネルギー技術の現状を述べた。まず、日本の経済産業省が指定する「新エネルギー」について説明し、太陽光、太陽熱、そして風力発電の現状を述べた。ついで本論文のテーマである波エネルギーの賦存量を述べ、その後世界と日本の波力発電技術開発の歴史と現状を述べた。そして、本研究の波力発電装置が可動物体型の範疇に入ることから、日本および世界各国で提案されている可動物体型波力発電装置の原理、長所と実用化の障害となっている課題を述べ、これらの技術が抱える問題点を克服すると期待される浮体・釣合錘式波力発電装置を説明した。

第2章では、本研究の検討対象である浮体・釣合錘式波力発電の機構を述べ、浮体・流体間の相互作用を2通りで評価した力学モデルを提示した。力学モデルの検証は水槽実験の結果との比較により行なった。力学モデルは発生電力、ワイヤ張力、浮体上下動の時系列を統一的に再現するには至っていないが、これらの変化傾向をよく表現した。また、実海域での稼働を想定した場合について計算を行い、装置の稼働で重要な物理量である平均発生電力、最大ワイヤ張力、最大トルクなどの諸量を見積もった。

第3章では、本提案の装置の効率的な稼働についての目途をつけるために、共振特性の基本的な解析を行った。基本的で重要な力学量として、装置の固有振動数、減衰比ならびに強制振動による相対変位の振幅と水面変動の振幅の比である変位応答倍率を評価した。

第4章では、本提案の装置の実用化への対応として、安定した電力供給に必要な浮体が一部没水状態を維持する条件を満たすために、共振特性解析を利用した装置諸元の決定方法を述べ、その具体例を挙げた。その結果、エネルギー変換効率が高かつ装置の稼働状態が好ましい諸元を簡便に決定することができた。

本研究で、浮体・釣合錘式波力発電装置の力学検討を行うことにより、本装置の実用化への一定の目途が立っていると言える。今後は、力学モデルの精緻化、特に回転体の運動方程式(式(4))の中で機械系の粘性減衰係数 $C'$ の見直しやU字管水槽内で系統的な実験を行う予定である。また、蓄力機能の検討は、未だ不十分な部分があり、検証実験を行い、モデルを確立することが必要である。遊水室内での稼働に関しては、傾斜底面をもつ場合を中心に支配要因を再整理して、系統的な実験を行うとともに、数値計算、大型水槽の実験を通して、遊水室内の水の運動全般について性状を明らかにしていくことが必要である。また、浮体・釣合錘の組を複数連結した構成の力学モデルを構築することが必要である。この他のこととして、実海域の不規則波の中で稼働する場合、水面変位の時系列をフーリエ級数で表現して解析することになる。