

博士論文

波浪中における
波エネルギー吸収の最大化を目的とした
浮体形状に関する研究

Study on the floating body shape
for maximizing the wave energy absorption in waves

国立大学法人 横浜国立大学大学院
環境情報学府

岡田 尚樹
Naoki Okada

2016年3月

ABSTRACT

Recently, research on marine renewable energy has drawn increasing attention. Wave power generation, which is rich in types for utilizing energy, has been developed for various sizes so far. In particular, "Wave power energy conversion device of movable floating body type" is notable in Japan, because it is designed for offshore condition where energy density is relatively high. For instance, Salter's Duck type and Pelamis type are famous for adopting motions of the floating body. A lot of research work on these shapes has been carried out.

However, implementation of the wave power generator does not exist yet all over the world. Challenges of the current wave power devices are as follows. Firstly, there does not exist any established evaluation method about wave power generation devices. Secondly, in order to improve power generation performance arranging plural floating bodies is promising, while many points are still unknown. Thirdly, when the wave period and the natural period of the floating body motion are tuned, energy absorption rate is possible to exert over 90%. However, the period range is localized.

In this study, to solve these problems, an optimal shape is searched in various conditions, with comparison geometrically. Firstly, for evaluation methods, the validity of evaluation methods are demonstrated by comparing the geometric differences among the shapes which are feasibly evaluated in appropriate evaluation methods. Secondly, considering arranging plural floating bodies, we studied the differences in shapes which are suitable for single hull and for multiple hulls under proper conditions. Thirdly, in view of the challenge that the tuning period is localized, we proposed to control the natural period of the floating body to tune with verified. We also concluded whether the shape suitable for the proposed method exists or not, and how much can be improved in energy absorption.

序論

はじめに

日本のエネルギー消費量は、高度経済成長期といわれる 1960 年代から 1970 年代初頭にかけて急激な増加を示した。1973 年と 1979 年の二度にわたる石油危機以降、エネルギーの効率的利用に努めたため、エネルギー消費の加速度的な増加はある程度緩和された。しかしながら、国民の生活面でのエネルギー消費は、快適さと便利さを求めるライフスタイルの普及に伴い、着実に増加傾向を示し続けている。1973 年度と 2011 年度のエネルギー消費量を比較すると民生部門では 2.4 倍、運輸部門では 1.9 倍といずれも高い。なお、二次エネルギーである電気は、家庭用及び業務用を中心にその需要は年々増加傾向にあり、1970 年度には、最終エネルギー消費に占める電力消費量の割合が 12.7%であった。これに対して、2011 年度では 23.1%に達した。そのため、電力消費量は約 460TWh から約 1050TWh とおよそ 2 倍以上増加する結果となった。このように我が国は世界的に見ても膨大なエネルギーを日々消費しているが、一次エネルギーとして供給される資源のうち、国内におけるエネルギー自給率は、原子力を除けばわずか 4.4%に過ぎない。これは他の主要先進国と比較すると著しく低い水準であり、我が国が如何に資源に乏しいことがわかる。このような背景の中、我が国では二度にわたる石油危機を契機に、多様なエネルギー源を模索する流れが起こった。特に 1979 年以降は新エネルギー開発が急進的となり、一次エネルギーに占める石油の割合は 1973 年では 75.5%であったのに対して、2010 年度には約 40.0%まで、大幅な削減に成功した。

新エネルギー開発の継続的努力はその後も続いたが、2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災によって新たな局面を迎えることとなる。この未曾有の大災害は、死者・行方不明者 18,000 名以上という甚大な人的被害をもたらすとともに、我が国のエネルギー供給の課題も浮き彫りにした。震災前では、国内での原子力発電に対する依存度が全電気供給率の約 30%程度まで及んでいたが、震災後には、各原子力発電所が定期検査に入り、2015 年 8 月¹まで全発電所が稼働停止状態となった。原子力の代替供給源のほとんどは火力発電が補うこととなり、震災前では約 6 割であった供給比率を約 9 割まで引き上げた。これにより、ますます化石燃料の消費量が急増し、再び中東依存度が高まった。燃料費や調達コストの削減は、我が国の経済にとっても重大かつ喫緊な課題といえる。

¹2015 年 8 月鹿児島県にある九州電力の川内原子力発電所 1 号機が再稼働した。

このような背景の中，新エネルギーの導入はまさにこれらの課題解決すなわちエネルギー自給率の向上，火力発電の燃料調達コストの抑制，更にはCO₂排出量の削減に貢献することになる．その他にも多くの点でメリットがあるが，出力に変動が多く不安定的であることや，高コスト，適地の確保が容易でない等の技術的，政治的課題も多い．新エネルギーの利用形態は，エネルギー源の性質により，供給サイドでは，「①自然エネルギー（再生可能エネルギー）」と「②リサイクル・エネルギー」に，需要サイドでは「③従来型エネルギー」の三種類に分類される．「①自然エネルギー」は風力エネルギー，太陽光・太陽熱エネルギー，海洋エネルギー，バイオマスエネルギー，地熱エネルギー等がある．その中でも，我が国は四方を海に囲まれており，排他的経済水域 (EEZ) が世界第6位という広大な海洋空間を持っていることから，海洋エネルギーの有効活用への期待は大きい．¹⁾²⁾³⁾⁴⁾

海洋エネルギーは，波力（波浪），潮汐・潮流，海流，海洋温度差，塩分濃度差の6種類に大別される．中でも波力はエネルギー密度が高く，比較的容易に得られるエネルギー源といわれている．世界の波エネルギー密度の分布図を Fig.1 (出典：NEDO 再生可能エネルギー技術白書 第2版) に示す．

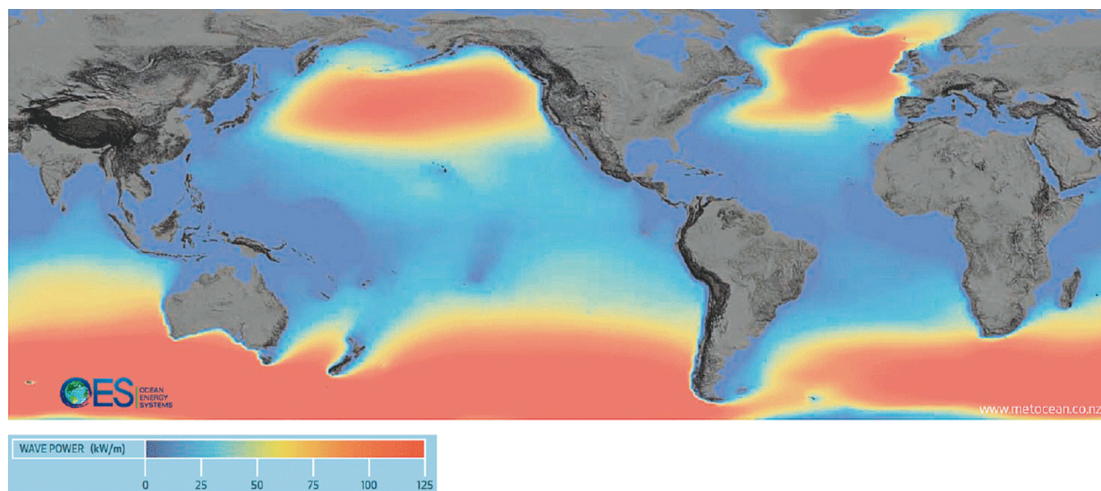


Fig. 1: Wave energy distribution map of the world (Annual average [kW/m]).

波エネルギーの理論的な賦存量は，世界全体で8,000～80,000TWh/年あると見込まれており，このうち現状技術による発電ポテンシャルは45,000TWh/年と言われている．Fig.1より地域別にみると，特に波エネルギー密度の高い海域は欧州西海岸，北米西海岸，南米の西岸・南岸，南アフリカの南岸，オーストラリアの西岸・南岸に分布している．大陸西海岸に高いエネルギーが集中するのは偏西風の影響である．そのため東海岸は比較的波エネルギー密度が低い．世界的にみて欧州は，最も波エネルギーポテンシャルに恵まれた地域の一つであり，英国（特にスコットランド）は波エネルギー密度が20kW/mから70kW/mと高く，欧州

の波エネルギーポテンシャルの約10%がスコットランド近海に賦存している。一方我が国は、ユーラシア大陸の東側に位置していることから、沿岸域で10kW/m未滿、沖合でも10~20kW/m未滿で、諸外国と比較して波エネルギー密度が高いとは言い難い。ただし、沿岸部など局所的にみれば、波力発電にとって理想的な環境が存在することはよく知られている。

日本近海の波エネルギーについては、1970年代に行われた前田・木下ら⁵⁾による日本近海、及び高橋ら⁶⁾による日本沿岸の波エネルギー試算例がある。前田・木下らは、日本造船研究協会の統計を用いて、沖合を含めた日本近海の波エネルギーを推定しており、沖合にいくほど波エネルギー密度は高く、特に太平洋岸の福島、茨城、千葉沖の波エネルギーが大きいと試算している (Fig.2, 出典：前田久明, 木下健：波浪発電, 東大生研, 31巻11号, 1979.)。また、日本周辺の平均波エネルギー密度を約10kW/mとし、日本全周(約5000km)で100%エネルギーを吸収した場合、約50GWのエネルギーが得られると報告している。

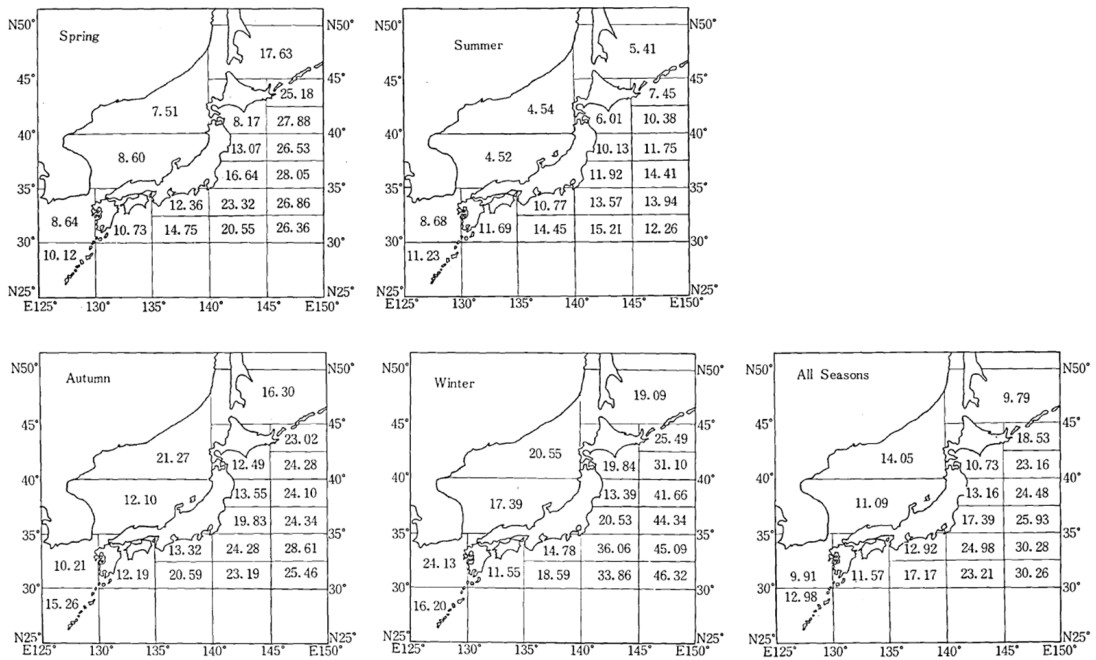


Fig. 2: Distribution of expected wave power [kW/m].

一方、高橋らは全国の主要港に配置された波浪観測網のデータを用いて、日本沿岸における波エネルギー密度の分布特性を調べた。それによると、日本沿岸の平均波エネルギー密度を7kW/mと試算しており、日本の総海岸線を5,200kmとした場合、日本沿岸に打ち寄せる波エネルギーは36GWと試算している。これは2010年の大手電力会社10社の総発電量(約207GW)の約3分の1に相当する。

日本近海における最新の波エネルギー賦存量の試算例は、2011年度にNEDOが発表したデータがあり、それによると、波エネルギーの賦存量（沖合100kmまで）は195GWと試算している。これは、2010年の大手電力会社10社の総発電量に相当する。また、現状技術を想定した場合の発電可能量は19TWh（年間電力需要の約2%）であると試算している。

ここでは、3種類の試算結果を紹介したが、これらは前提条件がそれぞれ異なるため、結果にばらつきがある。波力発電装置の導入を検討するに当たり、我が国周辺海域のより詳細なメッシュデータを得ることは、波力発電の技術的な課題と並び非常に重要な課題であるといえる。

一方、波エネルギーの利用方法として、波力発電の構想は古くからあり、最初の特許は1799年フランスのGirard⁷⁾によるものといわれている。しかし、その後100年以上の間は石油や石炭のような化石燃料が主なエネルギー供給源となったため、波力発電は影を潜めた。近代波力発電の研究は、1940年代の益田氏による航路標識ブイや灯台用電源の研究等で再開し、1974年には英国のSalterがSalter's Duck形状⁷⁾⁹⁾を開発した。Salter's Duck形状がNature誌上に発表されて以来、大規模な波力発電装置に関する研究が、日本と英国が中心となって世界各国で行われるようになった。波力発電システムは、波エネルギーから電気エネルギーに変換するシステムを総称していうが、エネルギーの吸収方式について、これまで多種多様な方式が考案されてきた。Falcão¹⁰⁾の分類方法に従えば、発電方式により、振動水柱型、可動物体型、越波型の3種類に大別できる(Fig.3)。また、設置形式としては、防波堤や海底に固定設置する固定式と、海面または海中に浮遊させる浮体式に分けられる。(Fig.7)

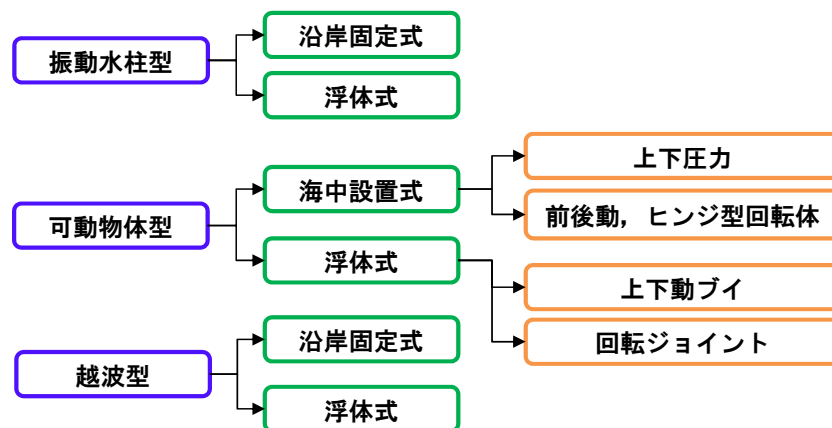


Fig. 3: Wave power generation system (Classification based on the absorption methods).

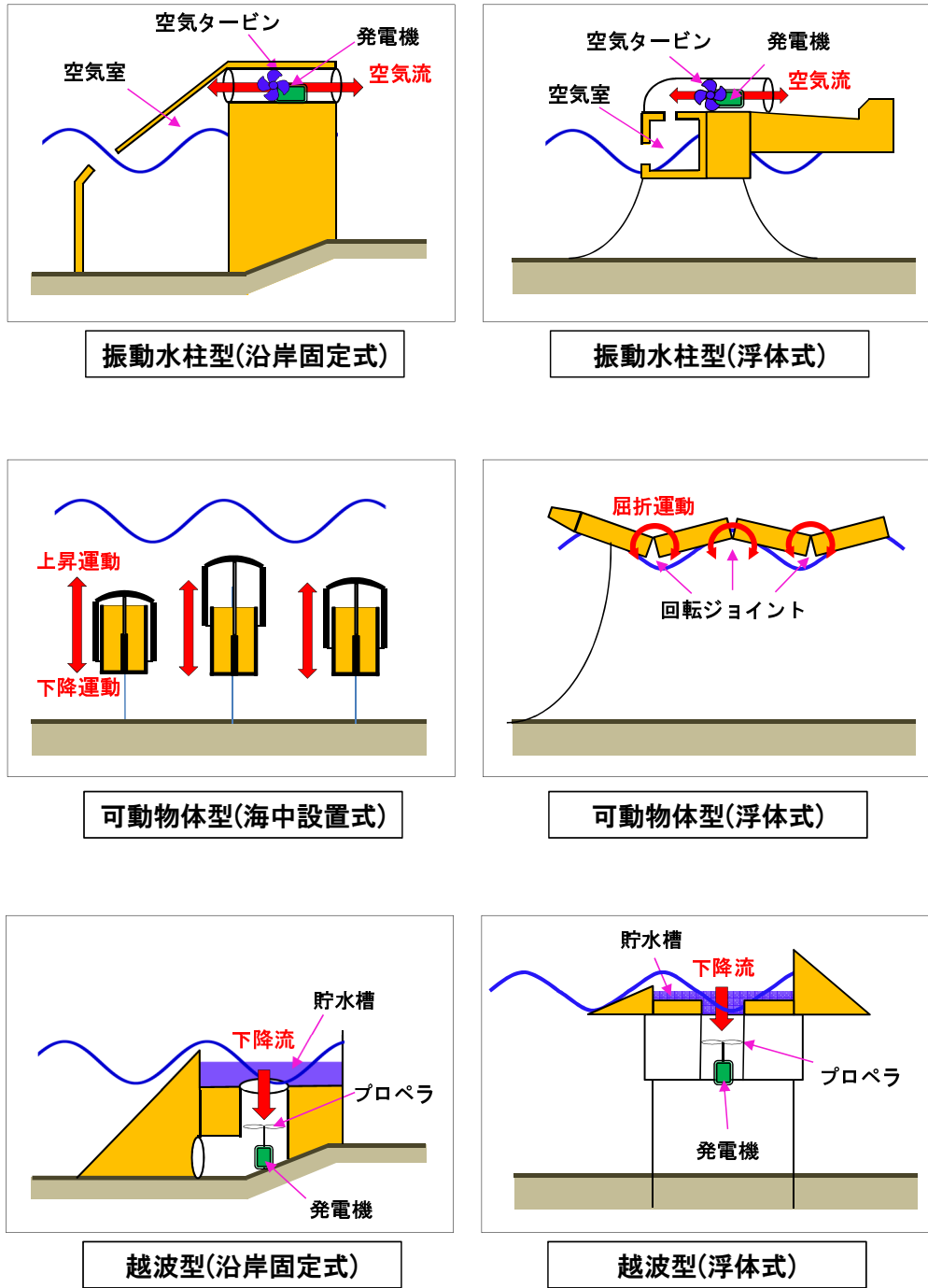


Fig. 4: Energy absorption system of wave power generation.

- 振動水柱型

振動水柱型は、装置内に空気室を設け、室内での海面の上下動による空気の振動流によって空気タービンを回す形式である。構造が簡素であり、空気を介してエネルギー変換するため、台風等の異常波浪に対する対策が取りやすく、比較的安全な形式とされている。振動水柱 (Oscillating Water Column) の頭文字をとって OWC システムとも呼ばれる。我が国では最も長く研究されてきた発電方式で、益田式の「航路標識ブイ」はこの発電方式である。その他には、Wavegen 社 (英国) の沿岸固定式波浪発電装置「LIMPET」¹¹⁾、Oceanlinx 社 (オーストラリア) の海岸設置型の振動水柱型装置¹²⁾、Ocean Energy 社の「Ocean Energy Buoy (OE-Buoy)」¹³⁾ 等が、この方式の代表例として挙げられる。我が国においては、益田式の航路標識ブイに始まり、海洋研究開発機構の「海明」¹⁴⁾ や「マイティホエール」¹⁵⁾¹⁶⁾ 等がこれに分類される。



(益田式航路標識用ブイ)
出典: 緑星社ホームページ
(<http://www.ryokusei.co.jp/>)



(LIMPET)
出典: Wavegen社ホームページ
(<http://www.wavegen.co.uk/index.htm>)



(Ocean Energy Buoy (OE-Buoy))
出典: Ocean Energy社ホームページ
(<http://www.oceanenergy.ie>)

Fig. 5: Oscillating water column(OWC) type.

- 可動物体型

可動物体型は、波の力によって浮体を振動運動 (主に上下, 前後, 回転運動) させ、その運動エネルギーを利用して電力に変換する。この方式は、海面設置型の装置として考案されることが多く、沖合に設置される波力発電装置として主流となるといわれている。また、事例は多くないが、海中に完全に没水させて使用するものも存在する。ヒンジ型の装置は、沿岸近くの海底に設置し、波エネルギーの水平方向成分を装置の前後動として吸収する。可動物体型の代表例として Pelamis wave power 社 (スコットランド) の「Pelamis」¹⁷⁾¹⁸⁾、Ocean Power Technologies 社 (米国) の「PowerBouy」¹⁹⁾、Aquamarine power 社 (英国) の「Aquamarine Oyster」²⁰⁾、我が国では「海陽」や室蘭工業大学で開発された振り子式²⁴⁾、神戸大学のジャイロ式波力発電装置²¹⁾ 等がある。Pelamis は直径 3.8m, 長さ 50m の円柱ユニット 3 基 (または 4 基) を油圧モーターを介して接続し、ユニット間の屈曲運動を

利用して発電する。PowerBuoy は直立柱状浮体と円盤型浮体を組み合わせた形状をしており、2 浮体の相対運動により柱状浮体中の油圧シリンダを駆動し発電する。この 2 例は最も実用化に近いものの一つといわれている。



(The Power buoy)

出典: Ocean Power Technologies 社
ホームページ
(<http://www.oceanpowertechnologies.com/index.htm>)



(Pelamis)

出典: Pelamis Wave Power 社
ホームページ
(<http://www.pelamiswave.com/>)



(Aquamarine Oyster)

出典: Aquamarine power社ホームページ
(<http://www.aquamarinepower.com>)

Fig. 6: Moving object type.

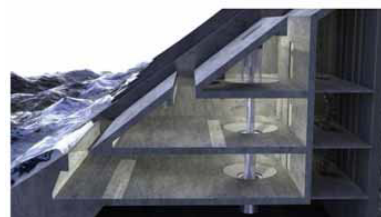
- 越波型

越波型は、波の這い上がる力を利用して平均水位より高い場所に大量の海水を貯留し、落下する力を利用してプロペラを回す。海岸線や人工の防波堤に設置する事も可能であるが、洋上の浮体装置にすることも可能である。代表的な例としてデンマークの「Wave Dragon」²²⁾ やノルウェーの「SSG (Sea Slot-cone Generator)」²³⁾ 等が挙げられる。



(Wave Dragon)

出典: Wave Dragon ApS.
(<http://www.wavedragon.net>)



(SSG (Sea Slot-cone Generator))

出典: WAVEnergy AS.
(<http://waveenergy.no/about/>)

Fig. 7: Overtopping type.

波力発電は、前記したように波エネルギーを吸収する方法が非常にユニークで、数多くの水槽実験や実機サイズの実海域実証実験が行われてきた。しかしながら、波力発電を含めた海洋エネルギー発電の開発段階は、世界的にみてもまだ実証試験の段階あり、商用運転しているプラントは存在しない。技術開発の最先端を行くのは Pelamis wave power 社の Pelamis である。2008 年にポルトガル沖で総出力 2,250kW(750kW × 3 基) の商用プラント (Agucadoura Wave Farm) が試験運転を開始した。商用運転が近いと期待された同装置であったが、運転開始後わずか数週間で故障が発生したため、2010 年まで稼働停止状態が続いた。2010 年から後継機である PelamisII が試験中である。

海洋エネルギー発電の技術開発ステップは陸上試験（水槽試験）と実海域試験の 2 段階に分けて考えられる。この分野において世界的に先進している欧米の企業は陸上試験の段階を終え、実海域での小規模プロトタイプ試験を終えた段階にある。実海域試験の多くはスコットランドの EMEC[®]) に代表されるような実海域試験場において小規模から大規模プロトタイプ機の技術開発が進められている。

我が国ではまだ実海域での小規模プロトタイプ試験を行っている段階で欧米から約 10 年の後れを取っているといわれている。波力発電を含む海洋発電を普及させるための課題は、高効率化と低コスト化である。特に我が国では、欧州に比べてエネルギー密度が低いとされるため、高効率・高信頼性を実現する海洋発電システムの技術開発が必要である。技術的進歩による高効率・高信頼性が向上することによって、コストの低下、効率性向上、設備利用率にも繋がり、幅広い海洋エネルギー普及が可能となり得る。

研究背景

前節でも述べたが、波力発電は波エネルギーを吸収する方法がユニークで、国内外で数多くの方式が考案されてきた。特に浮体式の可動物体型発電装置は、エネルギー密度が高い沖合に設置することを想定した装置であるため、遠浅な環境に乏しい我が国としては注目すべき発電型式である。可動物体型のように浮体運動を利用して波エネルギーを吸収する場合、効率良く波エネルギーを吸収出来る浮体形状を設計することが要求される。この節では、波力発電装置や消波浮体を想定した浮体形状に関する研究例を紹介する。

可動物体型では、「浮体の動揺を直接利用する方法」と「浮体と波との相対運動を利用する方法」に大別される。前者の代表的な例として、1970年代に英国の Salter によって開発された Salter's Duck 形状が効率良く波エネルギーを吸収できる浮体形状として有名である。Salter's Duck 形状は Fig.8 (出典：前田久明，木下健：波浪発電，東大生研，31 巻 11 号，1979.) のように G 点で回転し、波下側 (向かって左側) の形状は G 点を中心とした円弧であり、波上側 (向かって右側) は指数関数で表現される。エネルギー吸収効率をみると、波条件によっては吸収効率が 90%を超える非常に高い数値を示している。

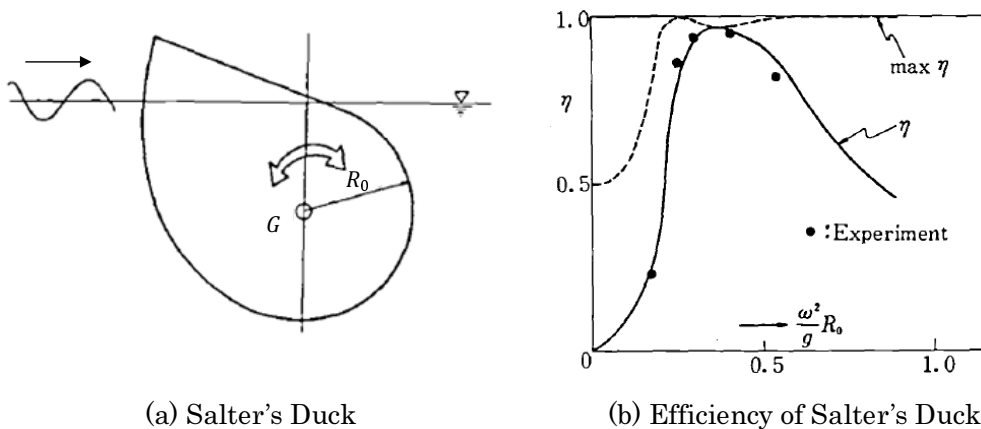


Fig. 8: The shape of Salter's Duck and efficiency of the shape.

前田ら²⁵⁾²⁶⁾²⁷⁾²⁸⁾は Salter's Duck 形状を例に取り、波力発電装置による波エネルギー吸収量の解析方法と推定方法の検討を行なった。その中で、長期にわたる吸収エネルギーの期待値を推定すると共に装置の有用性を示した。しかしながら、Salter's Duck 形状は上下・左右揺れを拘束した状態であれば効率良くエネルギーを吸収できるが、拘束していない状態では、回転運動以外に上下・左右揺れを同時に起こし、複数モードの連成影響によって波エネルギーの吸収性能が極端に低下することも確認した。

阿部ら³⁰⁾³¹⁾³²⁾³³⁾は波エネルギーを「浮体と波との相対運動から取り出す方法」において振動水柱型を扱っている。あるモードの運動でエネルギー吸収効率を最大とするためには、その他のモードによる運動を出来るだけ小さくする工夫が必要であると指摘し、回転運動によりエネルギー吸収を行い、他モードでの運動を小さくするために、波なし形状や複合浮体の連成運動を利用した形状の有用性を理論計算により検討し、水槽試験を通してその有用性を示した。しかしながら、波なし特性が現れる波周期が限定的であることや、空気室の影響で想定したほど波無し特性が現れなかったこと等を課題点として挙げている。

波エネルギー吸収効率の高い浮体形状を解析的に検討した研究例として、高木ら³⁴⁾の流線追跡法を用いる方法がある。この研究では、主に消波浮体を想定しているが、優れた波力発電装置は、波エネルギーを吸収して静穏海域を作り出すため、波力発電装置と消波装置には密接な関係がある。ここでは、左右非対称の二次元浮体をモデルとしており、上下揺れまたは横揺れの一自由度のモードを仮定している。流線追跡法とは、このモードで動揺する際の流場の速度ポテンシャルを用いて形状を決定する方法である。その結果、得られた浮体形状は想定した波周期において優れた消波特性を示しており、線追跡法で形状決定する方法の有効性を示している。ただし、ここで述べたものは単一のモードに限定しており、複合モードの動揺に対する検討には至っていない。

また、KASHIWAGIら³⁵⁾は境界要素法と遺伝的アルゴリズムを組み合わせることによって片側波無し形状についての検討を行っている。境界要素法を用いて算出した透過波係数によって評価する方法を説いている。ここでは、広い波周期において透過波が小さい形状を評価が高いとして形状探索を行っている。数値計算によって得られた最適形状を水槽試験によって確認する段階までは記されていないが、境界要素法と遺伝的アルゴリズムを組み合わせることで、目的の形状を探索するには有効な手段であることを示している。

一方、発電量を向上させるためには複数浮体を配置して総発電量を向上させる方法が考えられる。波力発電等では、波の進行方向に対して装置を直角に配置する、いわゆる横波を想定していることが多い。これに対して、小林ら³⁶⁾³⁷⁾は非対称断面をもつ浮体群を入射波に対して縦列に配置することで、単機配置より広い範囲の波周波数で高い波エネルギー吸収効率を得られると説いており、数値解析と水槽実験により検討した。この研究でも、Salter's Duck形状をモデルとしており、同じ形状を複数機配置することで浮体間の流体力学的な干渉効果を誘起させ、幅広い範囲で発電効率が向上することを示した。ただし、これは幅広い範囲で高いエネルギー吸収効率を得ることに主眼を置いたものであり、Salter's Duck形状のように単機配置で高性能の形状をモデルとして検討を行っている。しかしながら、複数浮体を縦列に配置する場合、浮体間の干渉効果やエネルギーの取得分布を考慮すると、単機で配置することに適した形状が縦列配置に適した形状と必ずしも一致するとは限らないと予想される。

研究目的および研究概要

前節において、波力発電装置や消波装置を想定した浮体形状に関する、近年の研究例について概説したが、波力発電装置は世界的に見ても未だ実現例はなく、研究段階に留まっているというのが現状である。実機での実現例が無いことから、確立した評価手法もまた存在しない。発電装置を対象としているため、水槽実験においても発電機構を設けて、発電量で直接的に評価する手法が理想的であるが、実機を想定した発電機構は、構造的に小型化することが困難であるため、水槽実験で発電量を測定することは困難である。そのため、現状行われている研究の多くは、発電機構の吸収エネルギー以外で評価することを余儀なくされている。発電機構の吸収エネルギーに代わる代替的な評価手法は、入射波と反射波の波エネルギー収支から、浮体の蓄えるエネルギーを算定する手法が一般的となっている。第章で紹介した Salter's Duck 形状は、その代表的な例であるといえる。この形状は、現状で最も波エネルギー吸収効率が良い形状とされているが、これは、ある周期における波エネルギー収支を評価して解析的に求めたものであり、発電量を基に設計された形状というものではない。「浮体の蓄えるエネルギー」すなわち「発電エネルギー」となることは、当然考え難く、「浮体の蓄えるエネルギーが大きい形状」が波力発電装置として優れているのかについては不明な点が多い。

一方、浮体式波力発電装置を考える場合では、当然、単機での発電能力を高めることが重要ではあるが、発電量を向上させるために、複数浮体を配置して総発電量を向上させることを検討することも重要である。複数浮体の配置を想定した研究例はいくつかあるが、それらは、Salter's Duck 形状のように単機で高性能の形状を複数機並べて検討することが一般的である。進入してくる波に対して、直角に配置する、いわゆる横列に配置する場合は、特に問題にはならないが、縦列に配置する場合は、浮体間の干渉効果やエネルギーの取得分布を考慮すると、単機で配置することに適した形状が、必ずしも複数機配置に適した形状と一致するとは限らないと思われる。

また、可動物体型の波力発電装置は、浮体運動の固有周期と波の周期が同調したとき、性能の良いものでは、エネルギー吸収率が90%以上と高い性能を発揮することを可能とするが、同調周期周辺から離れた周期域では、浮体運動が極端に小さくなるため、波力発電装置として機能しなくなることが課題とされている。実際の海域では、様々な周期の波が混在する不規則波であり、変動が激しい海域では、平均周期も1日のうちに幾度も変動する。そのような環境下で常に大きな動揺を得ることは非常に難しいといえる。

これらの課題に対して，本研究では次のことを明らかにすることを目的とする．

- ① 波力発電装置の評価手法について，現状代替的に用いられる評価手法の妥当性について
- ② 複数機配置を想定する場合，単機配置で優れた性能の浮体形状は，複数浮体を配置した場合においても優れた形状となるのかについて
- ③ 変動する海洋環境に対して，波周期と浮体運動を同調させる（同調制御）ことの有効性．また，これに適した形状の存在の有無について

上記した3点を明らかにするため，本研究では各条件に適した浮体形状を探索し，形状的にみた変化の程度などを比較検討する．波力発電を想定した浮体を奥行方向に無限に長い2次元浮体として扱い，波エネルギー吸収効率やエネルギー吸収量などから浮体形状を多角的に評価する．

以下に論文の構成を述べる．

第1章では，本研究における解析手法について述べる．また，解析手法を検証することを目的として行った水槽実験についてもここで述べる．

第2章では，浮体運動の基本的特性について事前検討した結果について述べる．本研究で対象とする浮体形状は左右非対称形状や側面形状に凹凸がある特異な形状も探索の対象となるため，そのような特異な形状を対象とした．

第3章では，評価手法に関して検討した結果について述べる．

第4章では，複数機配置に関して検討した結果について述べる．

第5章では，波力発電を想定した場合，海洋環境と浮体運動を同調させることの有効性およびこれに適した形状の有無について検討した結果について述べる．

第6章で結論を述べる．

目次

序論	i
はじめに	i
研究背景	ix
研究目的および研究概要	xi
第1章 解析手法	1
1.1 解析手法の概要	1
1.2 座標系等の定義および運動方程式	3
1.2.1 座標系等の定義	3
1.2.2 運動方程式	3
1.3 解析手法の検証実験	7
1.3.1 左右非対称形状および凹凸を含む形状について	7
1.3.2 水面付近に大きな傾斜を持つ形状について	11
1.3.3 付加的ダンピング係数について	13
第2章 浮体運動の基本的特性	15
2.1 形状による影響	15
2.1.1 応答振幅と運動エネルギーの関係	19
2.1.2 Heave および Roll 運動の連成影響	21
2.1.3 固有周期の影響	23
2.1.4 波強制力の影響	25
2.2 連成による影響	31
第3章 評価手法に関する検討	37
3.1 浮体形状の評価手法	37
3.2 浮体形状の設定方法	43
3.3 評価手法と最適形状の変化	49
第4章 複数浮体配置に関する検討	105
4.1 複数浮体を想定した場合での評価手法	107
4.2 複数浮体配置による最適形状の変化	111

第 5 章	\overline{GM} 制御による同調運動を想定した検討	149
5.1	\overline{GM} 制御による動揺増幅確認実験	151
5.2	\overline{GM} 制御と発電機構の仕事率の関係	163
5.3	\overline{GM} 制御による同調運動と最適形状の変化	169
第 6 章	結論	199
	謝辞	203
	参考文献	204
	付録	209
A1.	Bezier 曲線	209
A2.	遺伝的アルゴリズム	209
A2.1	遺伝的アルゴリズムの流れ	209
A2.2	遺伝子コーディング (浮体形状の設計)	211
A2.3	遺伝的操作	213

目 次

1	Wave energy distribution map of the world (Annual average [kW/m]).	ii
2	Distribution of expected wave power [km/m].	iii
3	Wave power generation system (Classification based on the absorption methods).	iv
4	Energy absorption system of wave power generation.	v
5	Oscillating water column(OWC) type.	vi
6	Moving object type.	vii
7	Overtopping type.	vii
8	The shape of Salter's Duck and efficiency of the shape.	ix
1.1	Flow chart of the calculation.	2
1.2	Coordinate system.	3
1.3	Experimental model.	7
1.4	Layout of the experiment.	8
1.5	Validation of the numerical accuracy of the calculation.	10
1.6	Validation of the sidewall effect (Body shape).	11
1.7	Validation of the effect of side wall.	12
1.8	Comparison of the difference according to change the coefficient of the critical damping	14
2.1	Definition and sketch of the side shape of the floating body under the water using trigonometric function.	16
2.2	Distribution of the evaluation value.	17
2.3	RAOs of motion and kinetic energy of body $A_W - E_L$.	19
2.4	Radiation forces.	21
2.5	Radiation force coefficients T_{32} .	22
2.6	RAOs of Heave motion.	23
2.7	Relationship of natural frequency and evaluation value.	24
2.8	RAO of Heave motion and exciting forces.	25
2.9	Comparison of $ F_{E2} /T_{22}$ of the shapes obtained by inverting the weather and lee side.	27

2.10	Comparison of E_{Heave} of the shapes obtained by inverting the weather and lee side.	27
2.11	Relationship of $ F_{E2} /T_{22}$ and $E.V_H$ of the shape which is obtained by inverting the weather and lee side.	28
2.12	Ratio of the T_{22} and $ F_{E2} $ at natural period.	29
2.13	Evaluation value of Heave motion.	29
2.14	RAO in case of changing the \overline{GM}	32
2.15	RAO in case of changing the $\overline{GM}(=0.40)$	33
2.16	Transition of the tuning period in case of changing \overline{GM}	34
2.17	Evaluation value in case of changing the \overline{GM}	35
3.1	Reflection and transmission waves by a floating body.	38
3.2	RAO of the floating body's motion and the kinetic energy.	40
3.3	Schematic view of the energy absorption mechanism.	41
3.4	Wave spectrum used in common to the four evaluation methods.	42
3.5	Design method of the floating body shape.	43
3.6	Comparison of each complement methods -12 Nodes-.	45
3.7	Comparison of each complement methods -10 Nodes-.	46
3.8	Comparison of each complement methods -8 Nodes-.	47
3.9	Comparison of each complement methods -6 Nodes-.	48
3.10	Difference of the optimal shape obtained by various evaluation methods.	50
3.11	Response Amplitude Operators of the optimal shapes in different evaluation method.	51
3.12	Changes in the EV_1 , EV_3 and EV_4 in case of changing the shape by morphing.	53
3.13	Summary of evaluation method 1 - $A_1^{(1)} \sim A_1^{(10)}$ -.	56
3.14	Summary of evaluation method 2 - $B_1^{(1)} \sim B_1^{(10)}$ -.	57
3.15	Summary of evaluation method 3 - $C_1^{(1)} \sim C_1^{(10)}$ -.	58
3.16	Summary of evaluation method 4 - $D_1^{(1)} \sim D_1^{(10)}$ -.	59
3.17	Evaluation method1 - $A_1^{(1)}$ -.	60
3.18	Evaluation method1 - $A_1^{(2)}$ -.	61
3.19	Evaluation method1 - $A_1^{(3)}$ -.	62
3.20	Evaluation method1 - $A_1^{(4)}$ -.	63
3.21	Evaluation method1 - $A_1^{(5)}$ -.	64
3.22	Evaluation method1 - $A_1^{(6)}$ -.	65
3.23	Evaluation method1 - $A_1^{(7)}$ -.	66
3.24	Evaluation method1 - $A_1^{(8)}$ -.	67
3.25	Evaluation method1 - $A_1^{(9)}$ -.	68

3.26	Evaluation method1 - $A_1^{(10)}$ -	69
3.27	Evaluation method2 - $B_1^{(1)}$ -	70
3.28	Evaluation method2 - $B_1^{(2)}$ -	71
3.29	Evaluation method2 - $B_1^{(3)}$ -	72
3.30	Evaluation method2 - $B_1^{(4)}$ -	73
3.31	Evaluation method2 - $B_1^{(5)}$ -	74
3.32	Evaluation method2 - $B_1^{(6)}$ -	75
3.33	Evaluation method2 - $B_1^{(7)}$ -	76
3.34	Evaluation method2 - $B_1^{(8)}$ -	77
3.35	Evaluation method2 - $B_1^{(9)}$ -	78
3.36	Evaluation method2 - $B_1^{(10)}$ -	79
3.37	Evaluation method3 - $C_1^{(1)}$ -	80
3.38	Evaluation method3 - $C_1^{(2)}$ -	81
3.39	Evaluation method3 - $C_1^{(3)}$ -	82
3.40	Evaluation method3 - $C_1^{(4)}$ -	83
3.41	Evaluation method3 - $C_1^{(5)}$ -	84
3.42	Evaluation method3 - $C_1^{(6)}$ -	85
3.43	Evaluation method3 - $C_1^{(7)}$ -	86
3.44	Evaluation method3 - $C_1^{(8)}$ -	87
3.45	Evaluation method3 - $C_1^{(9)}$ -	88
3.46	Evaluation method3 - $C_1^{(10)}$ -	89
3.47	Evaluation method4 - $D_1^{(1)}$ -	90
3.48	Evaluation method4 - $D_1^{(2)}$ -	91
3.49	Evaluation method4 - $D_1^{(3)}$ -	92
3.50	Evaluation method4 - $D_1^{(4)}$ -	93
3.51	Evaluation method4 - $D_1^{(5)}$ -	94
3.52	Evaluation method4 - $D_1^{(6)}$ -	95
3.53	Evaluation method4 - $D_1^{(7)}$ -	96
3.54	Evaluation method4 - $D_1^{(8)}$ -	97
3.55	Evaluation method4 - $D_1^{(9)}$ -	98
3.56	Evaluation method4 - $D_1^{(10)}$ -	99
3.57	Comparison of the body "D" and Salter's Duck.	101
3.58	Changes in the optimal shapes and the power in case of changing the damping coefficient.	102
3.59	Changes in the optimal shapes and the power in case of changing the natural period.	102
4.1	Layout drawing of the floating bodies.	106
4.2	Reflection and transmission waves by a floating bodies.	107

4.3	Schematic view of the energy absorption mechanism in the case of arranging a multiple floating bodies.	108
4.4	Changes in the optimal shape in case of number of the floating body changes (1-5).	112
4.5	Changes in the EV_4 in case of D_1 , D_2 , D_3 , D_4 and D_5	113
4.6	Changes in the optimal shape in case of number of the floating body changes (1-2).	115
4.7	Comparison of D_1 and D_2	116
4.8	Comparison of the case of arranging the D_2 and D_3 (each 2 hulls).	118
4.9	Comparison of the case of arranging the D_2 and D_3 (each 3 hulls).	119
4.10	Changes in the power in case of changing the arrangement D_5	121
4.11	The case of placed D_1 as a single hull.	122
4.12	The case of placed D_1 as 2 hulls.	123
4.13	The case of placed D_1 as 3 hulls.	124
4.14	The case of placed D_1 as 4 hulls.	125
4.15	The case of placed D_1 as 5 hulls.	126
4.16	The case of placed D_2 as a single hull.	127
4.17	The case of placed D_2 as 2 hulls.	128
4.18	The case of placed D_2 as 3 hulls.	129
4.19	The case of placed D_2 as 4 hulls.	130
4.20	The case of placed D_2 as 5 hulls.	131
4.21	The case of placed D_3 as a single hull.	132
4.22	The case of placed D_3 as 2 hulls.	133
4.23	The case of placed D_3 as 3 hulls.	134
4.24	The case of placed D_3 as 4 hulls.	135
4.25	The case of placed D_3 as 5 hulls.	136
4.26	The case of placed D_4 as a single hull.	137
4.27	The case of placed D_4 as 2 hulls.	138
4.28	The case of placed D_4 as 3 hulls.	139
4.29	The case of placed D_4 as 4 hulls.	140
4.30	The case of placed D_4 as 5 hulls.	141
4.31	The case of placed D_5 as a single hull.	142
4.32	The case of placed D_5 as 2 hulls.	143
4.33	The case of placed D_5 as 3 hulls.	144
4.34	The case of placed D_5 as 4 hulls.	145
4.35	The case of placed D_5 as 5 hulls.	146
4.36	Changes in the EV_4 in case of changing the interval of arrangement.	147
5.1	Conceptual diagram of controlling the \overline{GM}	150

5.2	Flow chart of the control signal.	150
5.3	The floating body and weight lifter for the experiment.	152
5.4	Relationship of the height of the movable weight and natural period.	153
5.5	Layout of the experiment for confirming the effect of controlling \overline{GM}	154
5.6	Response Amplitude Operators (Fixed at the lower end).	155
5.7	Response Amplitude Operators (Fixed at the higher end).	155
5.8	Time history of the motions (T=0.80[sec]).	156
5.9	Time history of the motions (T=0.85[sec]).	157
5.10	Time history of the motions (T=0.90[sec]).	158
5.11	Time history of the motions (T=0.95[sec]).	159
5.12	Time history of the motions (T=1.00[sec]).	160
5.13	Time history of the motions (T=1.05[sec]).	161
5.14	Comparison of the response amplitude of before and after the movement of the movable weight.	162
5.15	RAO and power in the state of without and with control the \overline{GM}	163
5.16	RAO and power in the state of changing the \overline{GM} -1-.	165
5.17	RAO and power in the state of changing the \overline{GM} -2-.	166
5.18	RAO and power in the state of changing the \overline{GM} -3-.	167
5.19	The changes of evaluation value in case of changing the range of the period of changing the \overline{GM}	168
5.20	Flow chart of the calculation in case of considering to control \overline{GM}	170
5.21	Simple Estimation of \overline{GM}	171
5.22	Comparison of body D_1 and body E_1	173
5.23	Changes of RAO in case with or without controlled $\overline{GM}(D_1$ and $E_1)$	175
5.24	Changes of Power in case with or without controlled $\overline{GM}(D_1$ and $E_1)$	176
5.25	Changes in power in case of changing the natural period of the generator.	177
5.26	Comparison of body D_1 , E_1 and F_1	178
5.27	Changes of RAO in case with or without controlled $\overline{GM}(D_1$ and $F_1)$	180
5.28	Changes of Power in case with or without controlled $\overline{GM}(D_1$ and $F_1)$	181
5.29	Comparison of body D_1 , $E_1(= F_1)$ and G_1	182
5.30	Changes of RAO in case with or without controlled $\overline{GM}(D_1$ and $G_1)$	184
5.31	Changes of Power in case with or without controlled $\overline{GM}(D_1$ and $G_1)$	185
5.32	Shape suitable for controlling the $\overline{GM} - E_1^{(1)}$	187
5.33	Shape suitable for controlling the $\overline{GM} - E_1^{(2)}$	188
5.34	Shape suitable for controlling the $\overline{GM} - E_1^{(3)}$	189

5.35	Shape suitable for controlling the $\overline{GM} - E_1^{(4)}$ -	190
5.36	Shape suitable for controlling the $\overline{GM} - E_1^{(5)}$ -	191
5.37	Shape suitable for controlling the $\overline{GM} - E_1^{(6)}$ -	192
5.38	Shape suitable for controlling the $\overline{GM} - E_1^{(7)}$ -	193
5.39	Shape suitable for controlling the $\overline{GM} - E_1^{(8)}$ -	194
5.40	Shape suitable for controlling the $\overline{GM} - E_1^{(9)}$ -	195
5.41	Shape suitable for controlling the $\overline{GM} - E_1^{(10)}$ -	196
5.42	Shape suitable for controlling the $\overline{GM} - E_1^{(11)}$ -	197
5.43	Shape suitable for controlling the $\overline{GM} - E_1^{(12)}$ -	198
A1	Calculation flow of GA	210
A2	The formation of the floating body shape	211
A3	Formation of design variables (Gene coding).	211
A4	Selection of parents.	213
A5	Genetic operations (crossover).	214
A6	Genetic operations applied to the floating body shape(crossover).	215
A7	Genetic operations mutation.	216
A8	Alternation of generations.	216

表 目 次

1.1	Principal particulars of the floating body.	8
3.1	Calculation conditions to consider the evaluation methods.	49
4.1	Calculation conditions to consider the arranging a plurality of floating body.	111
5.1	Principal particulars of the floating body and the movable weight lifter.	153
5.2	Calculation conditions to consider the \overline{GM} control.	172
A1	Estimated computation time and the number of genes.	212

第1章 解析手法

本研究は，浮体式可動物体型の波力発電装置を想定し，評価手法の妥当性や複数機の浮体を配置することを想定した場合等について，形状的観点から検討するものである．本章では，本研究で扱った解析手法について述べる．

まず，1.1節で解析手法の概要について述べる．1.2節では，本研究における座標系の定義と運動方程式について述べる．また，1.2節で述べた解析手法が，本研究で対象とする形状に対して，妥当な結果が得られるのか確認することを目的として検証実験を行った．1.3節では，この検証実験について述べる．

1.1 解析手法の概要

前記したように，本研究では，様々な条件において，それぞれに適した形状を比較することにより検討する．効率的に形状探索するため，本研究では遺伝的アルゴリズム (以下 GA) を適用した．また，浮体形状の流体力計算には，2次元境界要素法を適用した．本研究における形状探索の流れを以下に示し，フロー図を Fig.1.1 に示す．

それぞれの項目について，計算の流れに沿って簡単に説明する．

- 1 初期の浮体形状は，ランダム関数等を用いて初期形状の設計変数により設定
- 2 流体力係数は，線形ポテンシャル理論に基づき⁴²⁾ 算定
- 3 浮体の応答振幅は，浮体を剛体と見なした運動方程式と2の流体力係数を連成させ導出
- 4 形状の評価値は，波エネルギー収支や浮体の運動エネルギーなど(3.1節)で算出
- 5 最も評価値の高い形状への収束を判定．収束していなければ6へ．収束が判定されれば7へ進む
- 6 GAでの交叉や突然変異の考え³⁹⁾に基づいて浮体形状の再設定
- 7 最高評価値を得た形状をその評価方法や条件下での最適形状とする

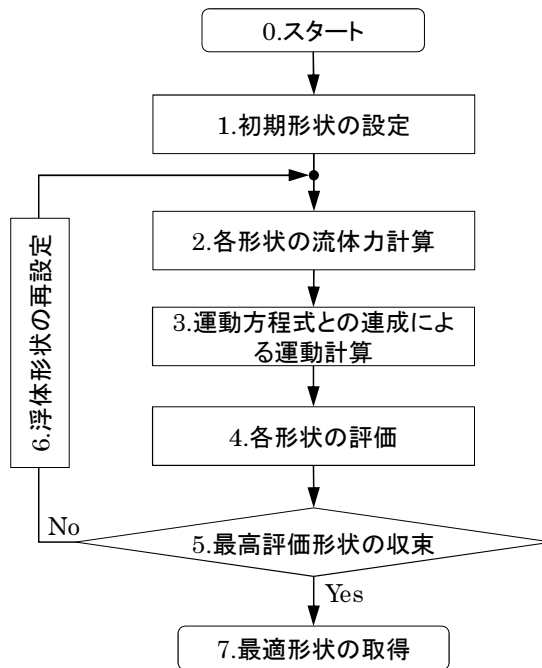


Fig. 1.1: Flow chart of the calculation.

なお，本研究では，公平な比較を行うために，ある条件における最適形状は，他の条件を検討する際には初期形状の1つとして取り扱っている．また，本研究における GA の取り扱いは付録 A2. に詳細を示す．

1.2 座標系等の定義および運動方程式

1.2.1 座標系等の定義

ここでは、本研究における座標系の定義および運動方程式について述べる．本研究では、浮体形状について検討するが、運動の計算においては、2次元境界要素法に基づく線形の流体力計算と浮体を剛体と見なした運動方程式を連成させる．Fig.1.2 に本研究における座標系および定義等を示す．

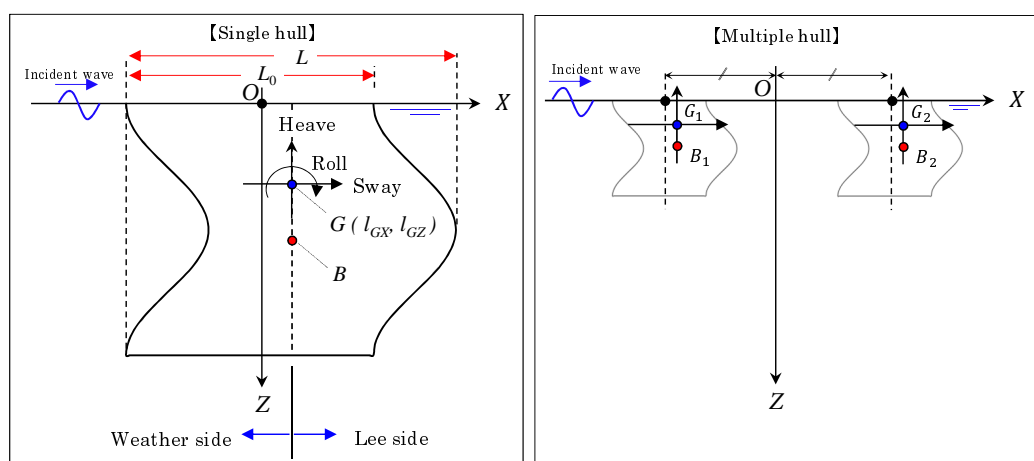


Fig. 1.2: Coordinate system.

Fig.1.2 に示すように、座標系は、静止水面上に原点がある空間座標系 $O-XZ$ で、 Z 軸は鉛直下向きを正としている．なお、座標原点 O は、浮体が単機の場合では浮面心とし、浮体が複数機の場合では、両端浮体の浮面心の中心とする．入射波は振幅 ζ_a 、円周波数 ω の微小振幅正弦波とし、本研究では、 X 軸負方向から向かってくるものとする．図中の L は浮体の X 軸方向最大長であり、 L_0 は水線長である． G 、 B はそれぞれ重心、浮心を示している．なお、重心 G は座標原点から、 X 方向に l_{GX} 、 Z 方向に l_{GZ} の位置にあるものとしている．一般的に重心 G の座標は、座標原点を通る鉛直線上にあることが多いが、本研究では、左右非対称形状を考慮して、浮心 B を通る鉛直線上にあるものとする．また、流体力は浮面心を原点とした座標系で算出し、運動方程式は重心 G まわりについて解く．左右揺れ (Sway)、上下揺れ (Heave)、横揺れ (Roll) は Fig.1.2 のように定義し、本論文では、重心 G より左側を浮体の波上側 (Weather side)、右側を波下側 (Lee side) とする．

1.2.2 運動方程式

本研究では Sway, Heave, Roll が連成する 2次元問題として検討する．本研究における浮体運動の運動方程式を (1.1) 式に示す．

$$\sum_{j=1}^3 \left\{ (M_{ij} + A_{ij}) \frac{d^2 X_j}{dt^2} + (B_{ij} + B_{Cij}) \frac{dX_j}{dt} + C_{ij} X_j \right\} = \text{Re} \left[\zeta_a E_i e^{i\omega t} \right] \quad (1.1)$$

添字 $i, j = 1, 2, 3$ はそれぞれ Sway, Heave, Roll を指しており, $M_{11} = M_{22} = m_0$, $M_{33} = I_{33}$, $i \neq j$ のとき $M_{ij} = 0$ である. ただし, m_0 , I_{33} は浮体質量および Roll 方向に関する慣性モーメントである. また, ω は入射波の円周波数, A_{ij} , B_{ij} , C_{ij} はそれぞれ j モードの動揺によって i 方向に働く付加質量係数, 造波減衰係数, 復原力係数である. B_{Cij} は運動速度に伴うダンピングを示している. X_j は j モードの応答振幅, E_j は単位振幅あたりの波強制力 (回転運動では波強制モーメント), ζ_a は波振幅である.

流体力は浮面心を原点として算出し, 浮体の運動方程式は重心 G まわりで解く. ここでは浮面心を原点とした座標系から重心まわりの運動に変換する方法を示す. 重心 G は x 軸の正方向に l_x , z 軸の正方向 (鉛直下向き) に l_z の位置にあるものとする. 重心位置における i モードの応答振幅を X_i^G , 波強制力を F_{Ei}^G とすると連成運動方程式は以下である.

$$\left[\mathbf{Z}_{ij}^G \right] \left[\mathbf{X}_j^G \right] = \left[\mathbf{F}_{Ei}^G \right] \quad (1.2)$$

ここで, i 方向に働く Radiation 流体力 F_{Ri} を

$$F_{Ri} = \sum_{i=1}^3 \left[A_{ij} - i \frac{B_{ij}}{\omega} \right] X_j \equiv \sum_{i=1}^3 T_{ij} X_j \quad (1.3)$$

のように表す. ただし添字 $i, j = 1, 2, 3$ とし, それぞれ Sway, Heave, Roll を指す. ω は波の円周波数, A_{ij} , B_{ij} は j モードの動揺によって i 方向に働く付加質量係数および造波減衰係数である.

次に, T_{ij} を用いて重心まわりに働く流体力 F_{Ri}^G に換算すると,

$$F_{R1}^G = T_{11}X_1^G + T_{12}X_2^G + (T_{13} - l_x T_{12} + l_z T_{11})X_3^G \quad (1.4)$$

$$F_{R2}^G = T_{21}X_1^G + T_{22}X_2^G + (T_{23} - l_x T_{22} + l_z T_{21})X_3^G \quad (1.5)$$

$$F_{R3}^G = (T_{31} - l_x T_{21} + l_z T_{11})(X_1^G + l_z X_3^G) + (T_{32} - l_x T_{22} + l_z T_{12})(X_2^G + l_x X_3^G) + (T_{33} - l_x T_{23} + l_z T_{13})X_3^G \quad (1.6)$$

となる. また, Heave, Roll 方向に働く重心まわりの復原力 S_2^G , S_3^G は

$$S_2^G = -\rho g \int [X_2^G + (x - l_x)X_3^G]n_z dS = -C_{22}X_2^G + C_{23}X_3^G \quad (1.7)$$

$$S_3^G = -\rho g \int [X_2^G + (x - l_x)X_3^G][(x - l_x)n_z - (z - l_z)n_x]dS = C_{32}X_2^G - (C_{33} + l_x^2 C_{22})X_3^G \quad (1.8)$$

のように表現できる. なお, 復原力係数 C_{ij} は以下のように計算した.

$$\begin{cases} C_{22} = \rho g L_0 \\ C_{23} = C_{32} = \rho g l_x L_0 \\ C_{33} = \rho g \nabla \overline{BM} - \rho g \nabla (\overline{OB} - \overline{OG}) = \rho g \nabla \overline{GM} \end{cases} \quad (1.9)$$

ここで, ρ , g はそれぞれ流体密度, 重力加速度であり, n_x および n_z は Fig.1.2 に示したように, 浮体側面に対する法線ベクトル \mathbf{n} の方向成分である. ∇ は没水部の断面積であり, M は横揺れのメタセンタ, \overline{GM} は Roll 方向の復原モーメントレバーである. (1.2) 式の Z_{ij}^G を T_{ij} , C_{ij} を用いて表すと

$$Z_{11}^G = -\omega^2(m_0 + T_{11}) \quad (1.10)$$

$$Z_{12}^G = -\omega^2 T_{12} \quad (1.11)$$

$$Z_{13}^G = -\omega^2(T_{13} - l_x T_{12} + l_z T_{11}) \quad (1.12)$$

$$Z_{21}^G = -\omega^2 T_{21} \quad (1.13)$$

$$Z_{22}^G = -\omega^2(m_0 + T_{22}) + C_{22} \quad (1.14)$$

$$Z_{23}^G = -\omega^2(T_{23} - l_x T_{22} + l_z T_{21}) - C_{23} \quad (1.15)$$

$$Z_{31}^G = -\omega^2(T_{31} - l_x T_{21} + l_z T_{11}) \quad (1.16)$$

$$Z_{32}^G = -\omega^2(T_{32} - l_x T_{22} + l_z T_{12}) - C_{32} \quad (1.17)$$

$$\begin{aligned} Z_{33}^G = & -\omega^2[m_0 \kappa^2 + (T_{33} - l_x T_{32} + l_z T_{31}) \\ & - (l_x T_{23} - l_x^2 T_{22} + l_x l_z T_{21}) \\ & + (l_z T_{13} - l_x l_z T_{12} + l_z^2 T_{11})] \\ & + (C_{33} + l_x^2 C_{22}) \end{aligned} \quad (1.18)$$

のように表せる. ただし, m_0 は浮体の質量, κ は Roll 方向の慣動半径である. また, 応答振幅 X_i^G と波強制力 F_{Ei}^G は

$$\begin{cases} X_1^G = X_1 - l_z X_3 \\ X_2^G = X_2 \\ X_3^G = X_3 \end{cases} \quad (1.19)$$

$$\begin{cases} F_{E1}^G = F_{E1} \\ F_{E2}^G = F_{E2} \\ F_{E3}^G = F_{E3} - l_x F_{E2} + l_z F_{E1} \end{cases} \quad (1.20)$$

のように換算できる.

1.3 解析手法の検証実験

本研究における運動計算の手法（2次元境界要素法に基づく線形の流体力計算と浮体を剛体とみなした運動方程式を連成させる手法.）は、海洋工学の分野では一般的な手法である。特に、箱型や半円柱型、ルイスフォーム形状等のような単純な形状に対して有効であることは、数多くの研究例からも実証されている。しかしながら、下記のような形状に関する研究例は意外と少なく、本手法で妥当な解が得られるのか不明な点が多い。

- ① 左右非対称形状や凹凸を含む特異な形状
- ② 水面付近に大きな傾斜がある形状

そのため、上述した特徴を有する模型を作製して水槽実験により検証した。以下、1.3.1には、①左右非対称形状及び凹凸を含む形状について、1.3.2には、②水面付近に大きな傾斜を持つ形状についてそれぞれ検証した結果について述べる。また、1.3.3では、1.2.2で登場したクリティカルダンピングの強さについて、水槽実験の結果を用いて検討した結果について述べる。

1.3.1 左右非対称形状および凹凸を含む形状について

左右非対称形状および凹凸を含む形状の一例として、Fig.1.3のような形状を供試模型として作成した。Fig.1.3（左）に見える、浮体底部の黒い板と、浮体内部の上方の黄色い物体は浮体に固定した錘であり、全体重心の位置が浮心を通る鉛直線上に位置するように調節している。

Table 1.1 に模型の諸元を示す。

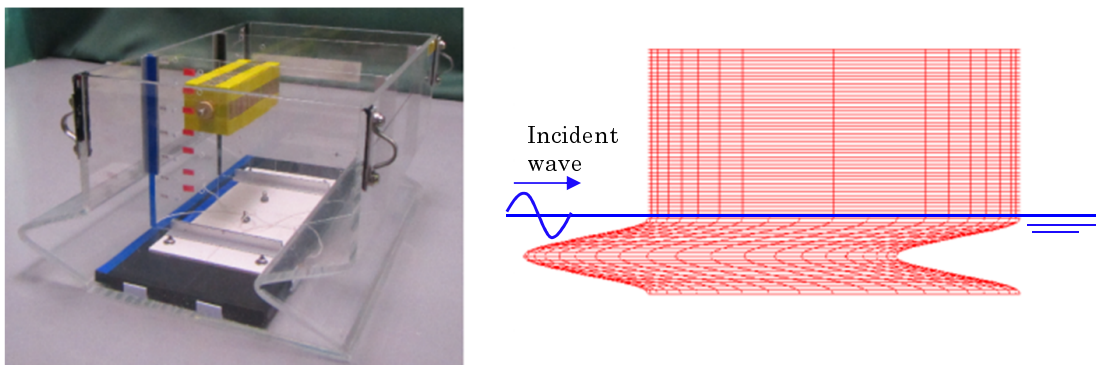


Fig. 1.3: Experimental model.

Table 1.1: Principal particulars of the floating body.

Parameters related to floating body	Value
Maximum length (x direction) L [cm]	26.7
Width B [cm]	30.0
Depth D [cm]	15.7
Draft d [cm]	6.7
Displacement W [kgf]	39.2
\overline{GM} [cm]	3.2
Gyradius κ [cm]	5.5

検証実験は佐賀大学海洋エネルギー研究センターの水槽（長さ 18m，幅 0.85m，深さ 0.90m，波振幅 5mm）で行った．Fig.1.4 のように浮体を水槽中央におき，浮体前後に長くて柔軟なバネによって係留した．運動は浮体内部に設置した 3 軸ジャイロセンサーとモーションキャプチャにより計測した．

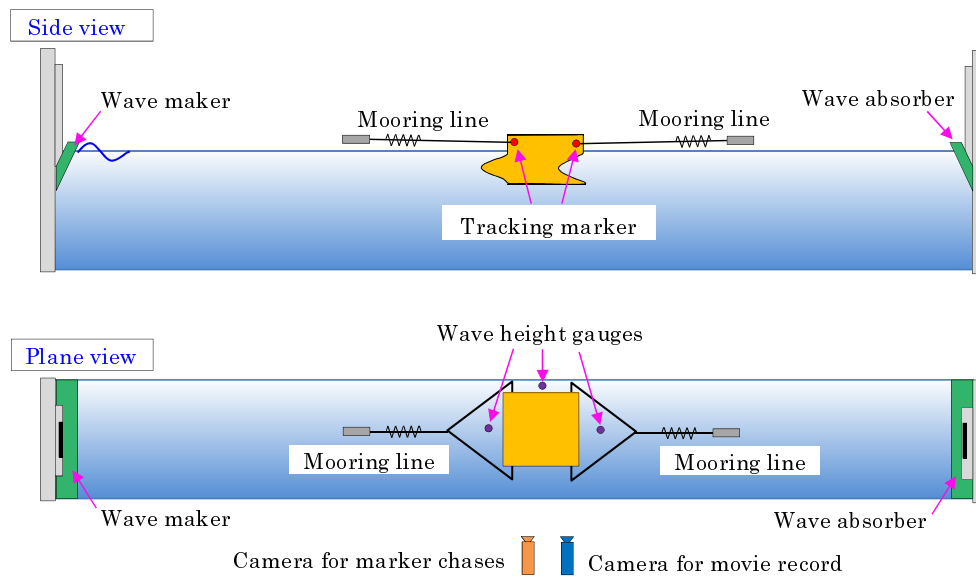


Fig. 1.4: Layout of the experiment.

解析手法の検証方法であるが、浮体運動の大きさ（周波数応答関数）の他に、造波減衰力に関するエネルギー関係式、Haskindの関係式による計算精度を確認することにより検証することとした。

造波減衰力に関するエネルギー関係式、波浪強制力に関する Haskind の関係式とは、流体力の計算に関連して、理論的に証明されている関係式であり⁴¹⁾⁴²⁾、以下のように表される。

$$\frac{B_{ij}}{\rho\omega} = \frac{1}{2}\{H_i^+(K)\overline{H_j^+(K)} + H_i^-(K)\overline{H_j^-(K)}\} \quad (1.21)$$

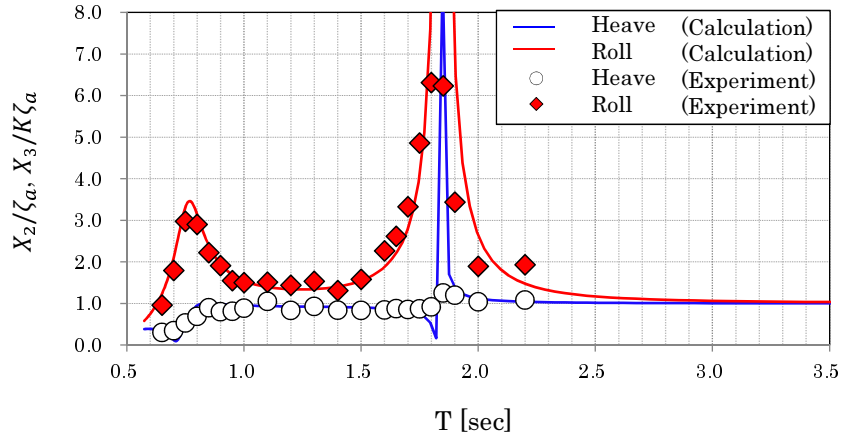
$$F_{Ej} = \rho g \zeta_a H_j^+(K) \quad (1.22)$$

式中の B_{ij} は造波減衰係数、 $H_i^\pm(K)$ は x 軸の正側、負側へ進む発散波を表す Kochin 関数、 K は無限水深における波数 ($= \omega^2/g$)、overbar は複素共役、 F_{Ej} は波強制力、 ζ_a は進入波の波振幅である。尚、Haskind の関係式は複素数であるが、確認には絶対値を用いた。

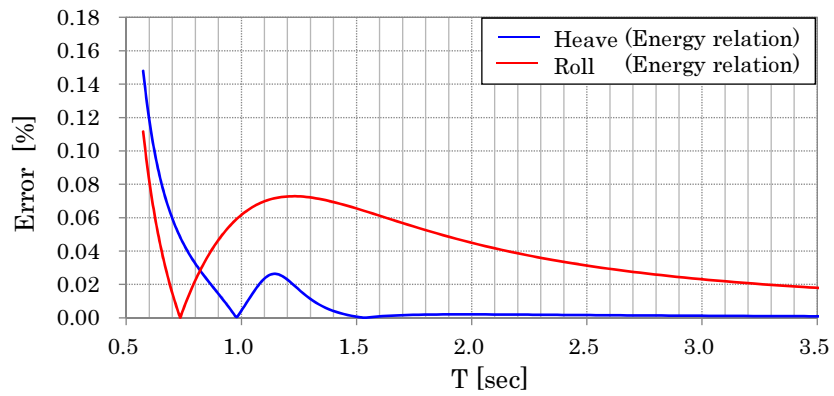
Fig.1.5 に実験値と数値計算値を周波数応答振幅で比較した結果 (a)、造波減衰力に関するエネルギー関係式で算出した計算精度 (b)、波浪強制力に関する Haskind の関係式で算出した計算精度 (c) を示す。ただし、それぞれ Heave および Roll 方向において比較検討した。

まず、(a) 周波数応答関数をみると、Heave および Roll の両運動とも実験値と数値計算値の間で、同調周期周辺を除いた範囲で良好な一致が確認出来る。また、(b) エネルギー関係式 (c) Haskind の関係式をみると、どちらの運動も短周期側（特に 0.5[sec] 付近）で計算誤差が大きくなる傾向が見えるが、誤差が約 0.18%以下であり、非常に精度が高いことがわかる。この結果より、供試模型のような左右非対称浮体および凹凸を含む形状の計算も本手法で問題は無いといえる。

(a) Motion of the bodies



(b) Energy relational expression for wave-damping force



(c) Haskind relational expression

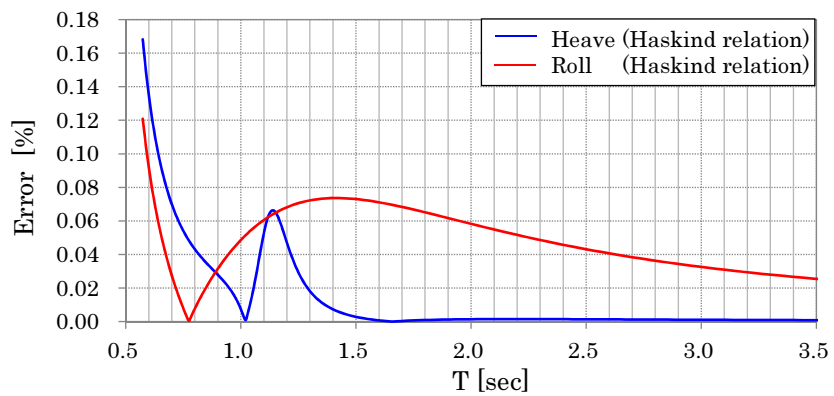


Fig. 1.5: Validation of the numerical accuracy of the calculation.

1.3.2 水面付近に大きな傾斜を持つ形状について

ここでは、水面付近に大きな傾斜を持つ形状について検証する。前述したように、このような形状は計算精度を低下させる原因となりえるといわれている。

水槽実験で用いた供試模型は、水面付近に急峻な傾斜があるため、この形状を基にして Fig.1.6 に示すような、水面に対して垂直に交わるように浮体の一部を変形した形状（いわゆる Wall sided の形状）を仮想的に作り、これら 2 形状を比較検討した。前者の形状（供試模型）を Body1，後者の形状（Wall sided の形状）を Body2 とする。

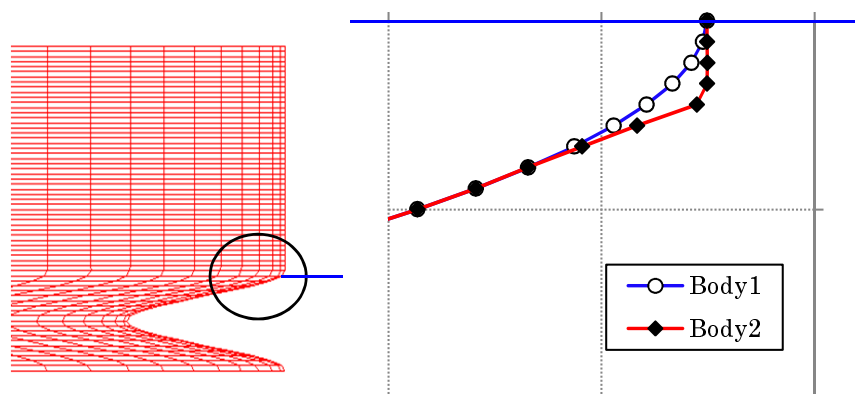


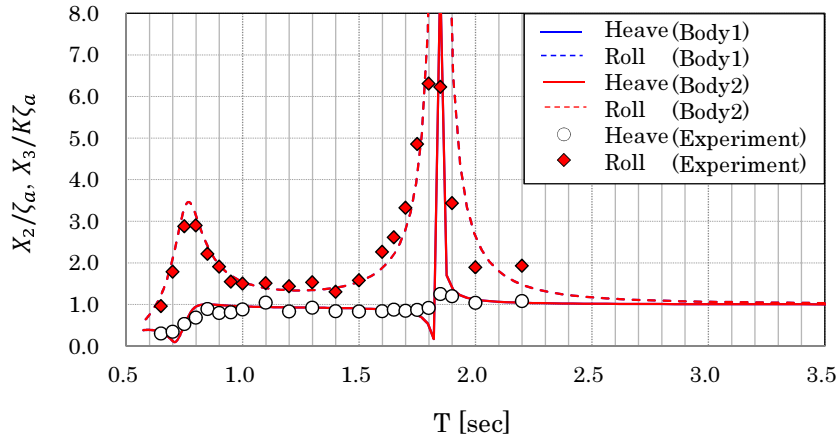
Fig. 1.6: Validation of the sidewall effect (Body shape).

Fig.1.7 に検討した結果を示す。Fig.1.7 の (a) は運動の周波数応答振幅で 1.3.1 で示した実験結果も重ねて示している。(b) および (c) はそれぞれ造波減衰力に関するエネルギー関係式及び Haskind の関係式によって算出した計算誤差である。

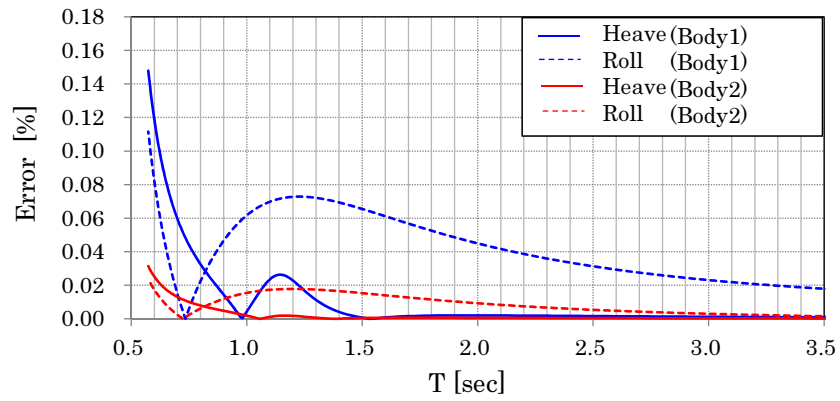
まず「(a) 運動の応答振幅」から Body1 と Body2 の応答振幅を比較するが、Heave, Roll とも形状間の違いによる目立った差は現れていないことがわかる。Body1 と実験値との比較は前述したが、Body2 と実験値も同様に良好な一致を示している。次に、(b), (c) から数値計算精度を検討した結果を確認するが、どちらの関係式においても、全体的に Body1（供試模型）より Body2（Wall sided の形状）の方が計算誤差は小さい。水面付近で大きな傾斜があることが、計算精度を下げる原因となっているが、Body1 の計算誤差はいずれの運動のどの周期においても、さほど大きいわけではなく、最大誤差でも約 0.18[%] 以下と非常に計算精度は高いことが分かった。

この結果より、水面付近における浮体側面が水面に直交していなくても、今回対象とした形状の計算では実用上問題はないといえる。

(a) Motion of the bodies



(b) Energy relational expression for wave-damping force



(c) Haskind relational expression

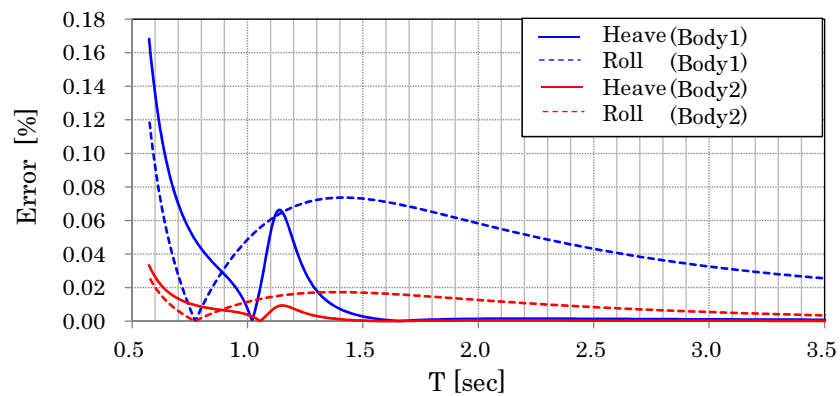


Fig. 1.7: Validation of the effect of side wall.

1.3.3 付加的ダンピング係数について

本研究では，固有周期における応答の発散を防ぐため，運動速度に伴うダンピングを考慮した．以下に 1.2.2 で示した運動方程式を再び示す．

$$\sum_{j=1}^3 \left\{ (M_{ij} + A_{ij}) \frac{d^2 X_j}{dt^2} + (B_{ij} + B_{Cij}) \frac{dX_j}{dt} + C_{ij} X_j \right\} = \text{Re} \left[\zeta_a E_i e^{i\omega t} \right] \quad (1.23)$$

(1.23) 式中の B_{Cij} は，一般的なクリティカルダンピングの定義式に従って (1.24) 式のように与えた．

$$\begin{cases} B_{C22} = 2\xi_2 \sqrt{(A_{22}(\omega) + M_{22})C_{22}} \\ B_{C33} = 2\xi_3 \sqrt{(A_{33}(\omega) + M_{33})C_{33}} \\ B_{C23} = B_{C32} = -l_{GX} B_{C22} \end{cases} \quad (1.24)$$

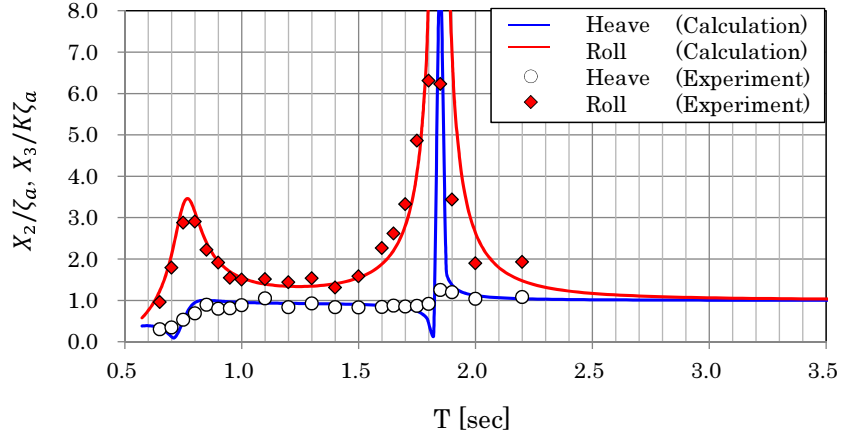
式中の ξ_2 と ξ_3 は，ダンピングの強さを調整するための係数であり， l_{GX} は座標原点から重心位置までの X 軸方向の距離である．

ダンピングの強さを調整する ξ_2 と ξ_3 は，1.3 で示した水槽実験の結果を基にして決定することとした．Fig.1.8 に水槽実験の結果とダンピング強さを変えて計算した結果を重ねて示す．

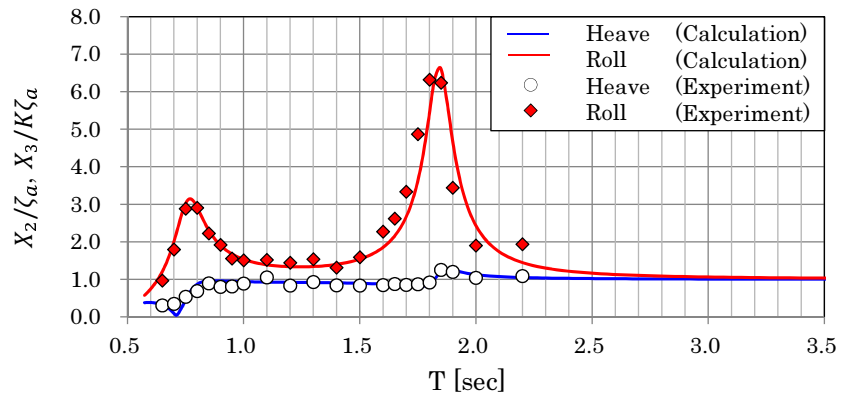
Fig.1.8(a) は，ダンピングを与えていない場合での計算結果であり，1.5(a) と同じものを再掲している．Fig.1.8(b) は ξ_2 を 0.01， ξ_3 を 0.05 としたときの計算結果であり，(c) は ξ_2 を 0.01， ξ_3 を 0.10 としたときの計算結果である．Fig.1.8 の中で，(b) の条件が最も実験結果に近いことがわかる．この結果より，本研究におけるダンピング強さの条件は，以下の通りとした．

$$\begin{cases} \xi_2 = 0.01 \\ \xi_3 = 0.05 \end{cases} \quad (1.25)$$

(a) $\xi_2 : 0.00, \xi_3 : 0.00$



(b) $\xi_2 : 0.01, \xi_3 : 0.05$



(c) $\xi_2 : 0.01, \xi_3 : 0.10$

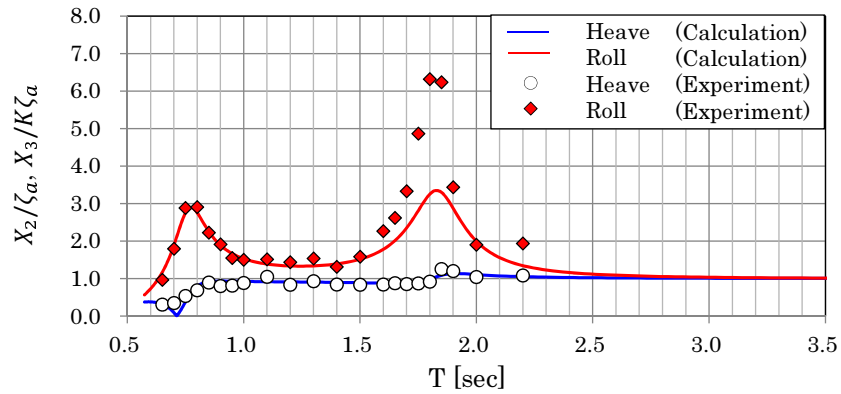


Fig. 1.8: Comparison of the difference according to change the coefficient of the critical damping

第2章 浮体運動の基本的特性

本研究では、浮体運動を利用して発電する可動物体型波力発電装置を主な対象としているため、対象とする浮体形状も、波浪中において比較的大きな応答を示す浮体形状が主となる。これまで、船舶や海洋構造物等の応答特性に関する研究例は数多くあるが、これらは、初期の段階から、比較的小さいものに対象範囲を絞って検討することが多く、比較的大きな応答の形状を対象とした研究例は意外と少ない。そのため、本研究では、応答の大きさに関する制限を設けることなく、設定した形状を用いて浮体運動の基本的な特性を検討した。

本章では、便宜的に定めた形状変化の範囲内で浮体運動の基本的な特性を事前に検討したことについて述べる。

2.1 形状による影響

浮体形状については、排水量等を一定としても、その可能性が無限にある。そこで、まず基本的な特性を把握するため、便宜的に定めた形状変化の範囲内で浮体形状とその応答の関係を検討する。ここで検討した方法は、まず浮体を波上側と波下側に分けて、浮体形状の片側半分を複数パターン用意する。これらを波上側と波下側でパラメトリックに組み合わせを変化させ、応答の変化を観察する。今回検討に用いた浮体形状（片側半分を図示）を Fig.2.1 に示す。

これらは、浮体の側面形状を深さ方向に1周期となる三角関数で表現し、位相を変化させることによって形成した形状群である。三角関数の性質を利用することで、没水部の面積は一定としたまま、水線長や凹凸の出現位置をパラメトリックに変化させることが出来る。Fig.2.1 に示した8種類の形状は、位相を $\pi/4$ [rad] ずつ変化させることによって形成した。凸部の頂点位置が浮体底部にある形状を A とする。A から H へと位相が変化していく過程で、凸部の頂点が喫水深さ d に対して $8/8d$, $7/8d$, $6/8d$, \dots $1/8d$ のように水面に向かって（上方へと）推移する。また説明の都合上、対象の形状群を次のように大別する。すなわち凹部が中央付近にある形状を凹型 (A, B, H), 凸部が喫水深さの中央付近にある形状を凸型 (D, E, F), 残りの2形状をS型 (C, G) のように3種類に分類して考えることにする。A から H の形状を左右で様々に組み合わせることによって64通り (8×8) の形状を検討することが出来る。

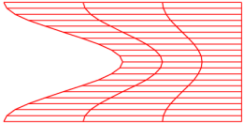
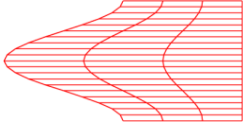
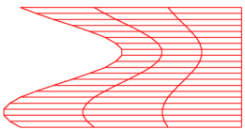
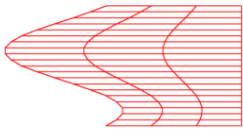
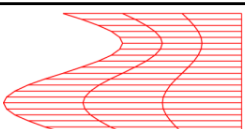
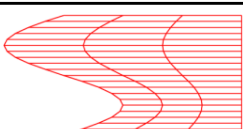
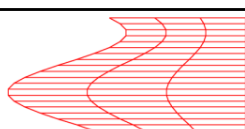
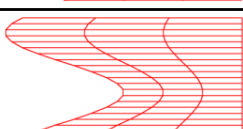
	A	“凹”Type		E	“凸”Type
	B	“凹”Type		F	“凸”Type
	C	“S”Type		G	“S”Type
	D	“凸”Type		H	“凹”Type

Fig. 2.1: Definition and sketch of the side shape of the floating body under the water using trigonometric function.

次に、浮体形状とその応答特性の基本的な関係を調べるにあたり、評価に用いた指標について述べる。これには、以下の3式に示すような運動エネルギーに関する評価値を指標とした。ここでは、復原力のある Heave と Roll に関してのみ考えることとし、Heave 方向の運動エネルギー： E_{Heave} 、Roll 方向の運動エネルギー： E_{Roll} 、およびそれらの総和： $EV(EvaluationValue)$ といったように分けてそれぞれで評価する。

$$E_{Heave} = \frac{1}{2}m_0 \int \left(\frac{X_2}{\zeta_a} \omega \right)^2 dT \quad (2.1)$$

$$E_{Roll} = \frac{1}{2}m_0\kappa^2 \int \left(\frac{X_3}{\zeta_a} \omega \right)^2 dT \quad (2.2)$$

$$E.V = E_{Heave} + E_{Roll} \quad (2.3)$$

ただし、式中の m_0 は浮体質量、 κ は Roll 方向の慣動半径、 ζ_a は波振幅である。(2.1)、(2.2) 式中の被積分関数は単位波振幅あたりの応答振幅に円周波数を掛け合わせ、これらを2乗することで単位振幅あたりのエネルギーに相当する項とした。しかし、このまま比較に用いると当然入射波周期によって結果が異なるため、一定範囲の積分値を用いることとした。積分範囲は、長周期域での運動が収束することを考慮して設定した。また、 m_0 、 κ は実験値を参考に適当な値を用いた。

本節では形状の違いによる応答の変化を明確にするため、 \overline{GM} と慣動半径は一定とした。対象形状の評価値を Fig.2.2 に示す。

Fig.2.2 は波上側の形状を凹型 (A_W, B_W, H_W), S 型 (C_W, G_W), 凸型 (D_W, E_W, F_W) のように 3 種類に分けて並べており、縦軸と横軸はそれぞれ評価値 ($E.V, E_{Heave}, E_{Roll}$) と波下側の形状名である。形状名は Fig.2.1 で定義した記号を用いて (波上側形状) - (波下側形状) のように表現する。

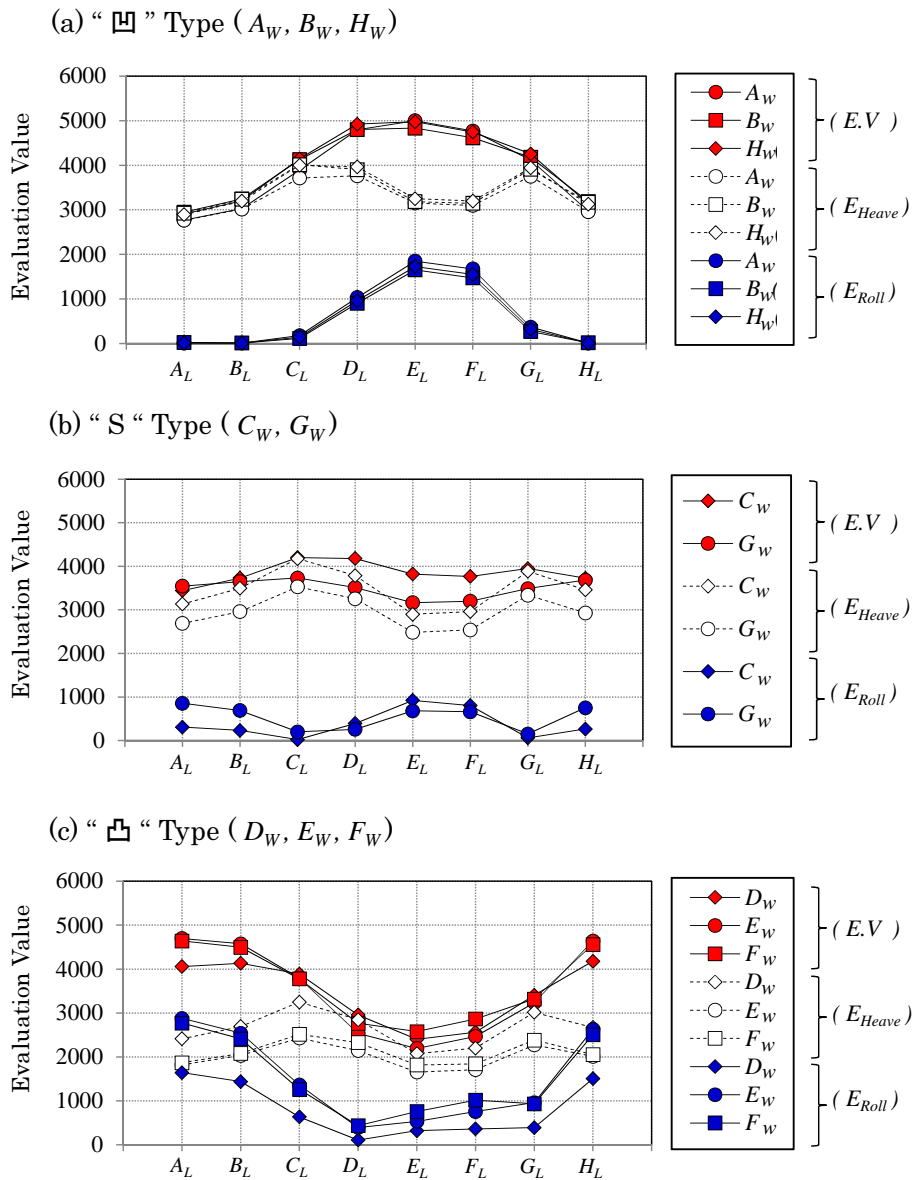


Fig. 2.2: Distribution of the evaluation value.

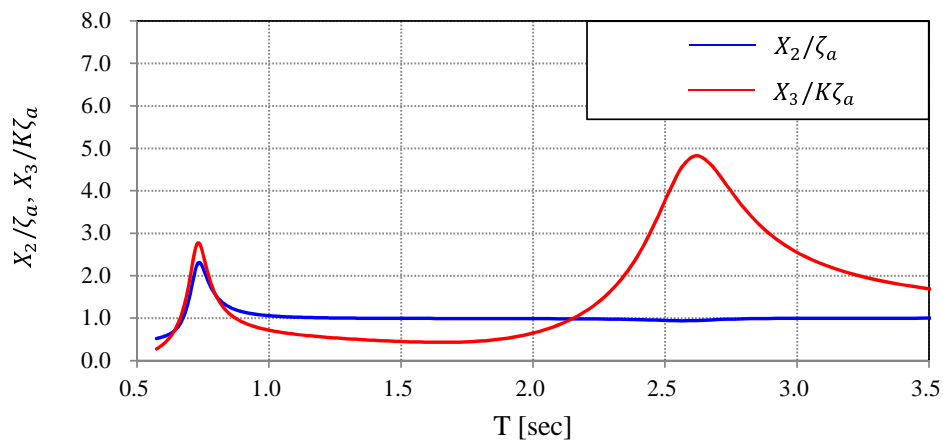
Fig.2.2 をみると、いずれの形状も波下側形状の変化に対して評価値の推移していく様子が滑らかなので、浮体側面を表現する三角関数の位相は $45[\text{deg}]$ 刻みでも十分に全体の傾向を捉えられているといえる。64 通りの形状がある中で最も総合評価 $E.V$ が高い形状は、 $A_W - E_L (\approx 5,000)$ であり、最も低い形状 $E_W - E_L (\approx 2,200)$) に対して約 2 倍の評価値を示している。次に、形状の組み合わせによる評価値の傾向を確認するが、まずは総合評価 $E.V$ の結果に着目する。波上側が凹型 (A_W, B_W, H_W) のいずれかであると、対となる形状は凸型 (D_L, E_L, F_L) のときに評価が高い。例えば $A_W - E_L$ 等がそれである。反対に、波上側が凸型のいずれかであると、対となる形状は凹型のときに評価が高い傾向となる。これらは、Heave と Roll の総合評価を観察した結果であるが、Roll の評価値 E_{Roll} をみても大凡同様の傾向が見られる。一方、Heave の評価値 E_{Heave} は波上側の形状に関わらず波下側の形状が S 型 (C_L, G_L) のとき、評価が大きくなる傾向がみられる。

以上に述べたことは、全形状の評価値を概観することで、波上側と波下側の組み合わせによって評価値がどのように推移するのか大まかな特徴を述べたに過ぎないが、これ以降に、このような結果となった原因について詳述する。

2.1.1 応答振幅と運動エネルギーの関係

ここでは, Heave 及び Roll の応答振幅を無次元化した周波数応答振幅と, 運動エネルギーの関係について述べる. 先に示した対称形状の中で, 最も総合評価が高い形状 $A_W - E_L$ を例として考察する. Fig.2.3 に「(a) 無次元化した運動の周波数応答振幅」及び「(b) 運動エネルギーの周波数応答振幅」を示す.

(a) Motion



(b) Kinetic energy

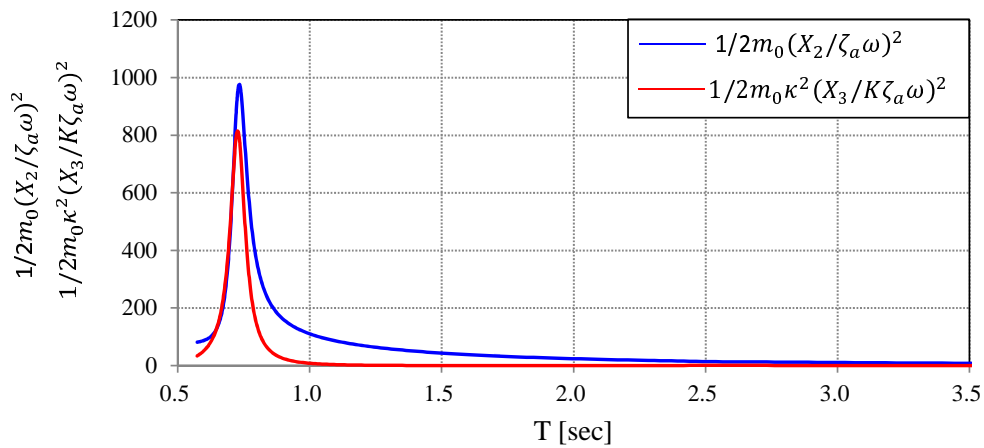


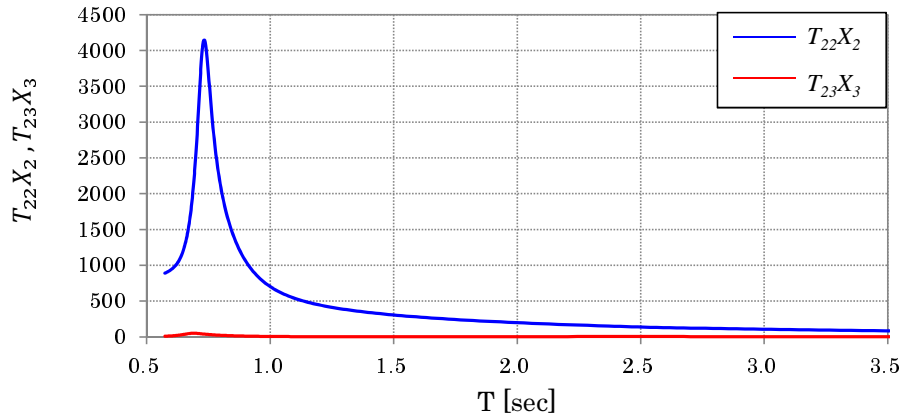
Fig. 2.3: RAOs of motion and kinetic energy of body $A_W - E_L$.

Fig.2.3 より，まず運動の応答振幅に注目する． $T = 0.7$ と $T = 2.7$ にそれぞれ Heave と Roll の固有周期がある．Roll 運動では，それぞれのピークにおける応答振幅はおよそ 2.8 及び 4.8 であるが，運動エネルギーを見ると，Heave の固有周期 ($T = 0.7$) でのピークに対して，Roll 固有周期 ($T = 2.7$) のピークは小さく目立たない．これは評価値の計算過程で，応答振幅に角周波数 ω を掛けるため，周波数の高いもの (短周期側のピーク) が結果に大きく反映されているためである．特に Roll 運動では，運動エネルギーは波傾斜 $K\zeta_a$ で無次元化した値ではなく，波振幅 ζ_a で除した応答振幅を用いている．そのため， $K\zeta_a$ で無次元化した応答振幅に波数 K がさらに掛け算されるから，周波数が高い範囲でのピークが評価値に大きく反映されたためと考えられる．

2.1.2 Heave および Roll 運動の連成影響

次に Heave 運動と Roll 運動の連成影響について述べる．ここでも形状 $A_W - E_L$ を例とする．この形状の Radiation 流体力成分 $T_{ij}X_j$ を Fig.2.4 に示す． $T_{ij}X_j$ とは j 方向の運動によって i 方向に働く Radiation 流体力を意味する．

(a) Heave direction



(b) Roll direction

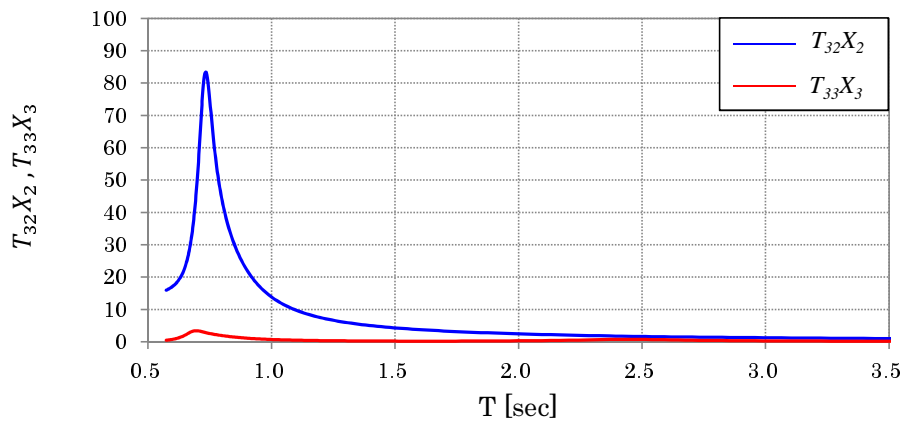


Fig. 2.4: Radiation forces.

Heave 方向 (a) では，ピーク点 ($T = 0.7$) において，Heave 運動による流体力 $T_{22}X_2$ は Roll 運動による流体力 $T_{23}X_3$ の約 80 倍大きい．一方，Roll 方向 (b) では，ピーク点において，Heave 運動による流体力 $T_{32}X_2$ は Roll 運動による流体力 $T_{33}X_3$ の約 24 倍大きい．他の形状でもほぼ同程度のオーダーであることを確認しており， $T_{22}X_2$ は $T_{23}X_3$ の数十～数百倍， $T_{32}X_2$ は $T_{33}X_3$ の数倍～数十倍というオーダーで大きい．すなわち，いずれのモードにおいても，Heave 運動によって起因した流体力の影響が非常に大きいということがわかる．つまり，連成影響を考慮した運動エネルギー最大化となる形状を探索するならば，Heave 運動が大きい形状の探索を優先的に考えることが有効であるといえる．

ただし、Heave と Roll の相互連成力の強さは当然形状によって異なる． Fig.2.5 に対象とした全形状の固有周期における Radiation 流体力係数 T_{32} を読み取った結果を示す．

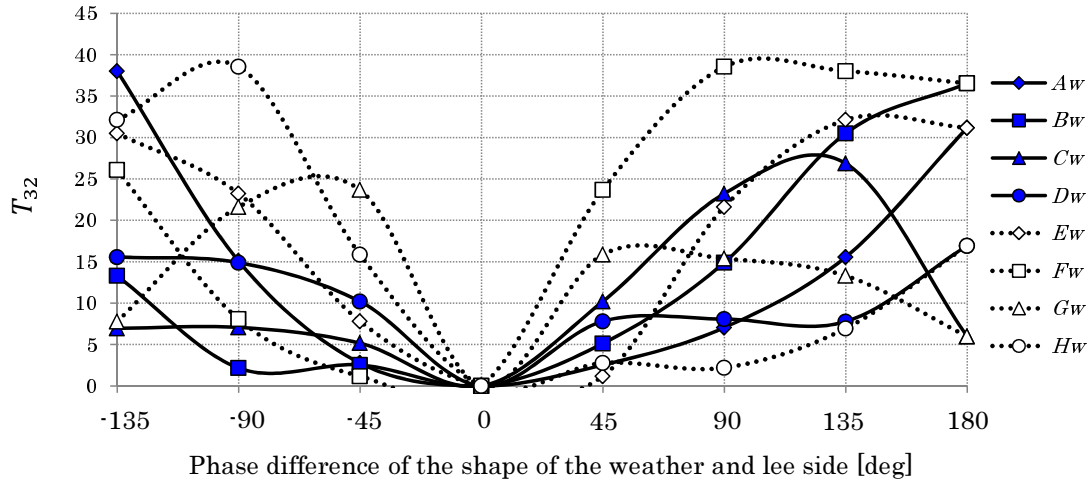


Fig. 2.5: Radiation force coefficients T_{32} .

Fig.2.5 の横軸は波上側形状と波下側形状の凸部のずれを表しており、左右の組み合わせを位相差で表現している．半断面形状 A から H までを位相で表すと 45 度刻みでずれていくため、例えば、A と E の組み合わせでは位相差 180[deg] であり、左右対称形状ならば位相差 0[deg] ということになる．

Fig.2.5 より、まず左右対称形状（位相差 0[deg]）の T_{32} は 0 となることが確認できる．反対に波上側形状が B_W , F_W , H_W であると、波下側形状の組み合わせ次第で T_{32} が最も高くなる可能性があることがわかる．特に、波上側形状を F_W とすると、 T_{32} が高くなる組み合わせは位相差 90, 135, 180[deg] のときであり、他の形状に比べて T_{32} が高くなる組み合わせの幅が広い．

このように、形状によって Heave と Roll の連成力の強さに大きく差が現れることを示したが、全体的にみて左右の位相が 180[deg] ずれた場合に連成力が高くなる傾向があることが分かった．位相が 180[deg] ずれた場合とは、凸部の頂点位置（深さ方向）と同じ深さにもう一方の凹部の頂点がある状態のことを指す．平たく言えば、平仮名の「く」の字や平行四辺形のような形状のことである．

2.1.3 固有周期の影響

Roll 単独の固有周期は、重心高さや重量分布を工夫することである程度調節することが可能であるが、Heave 単独の固有周期は水線長と浮体質量、付加質量のバランスで変化する。したがって固有周期は質量が同じであれば形状によって決定される。今回対象にした形状は各々の水線長がパラメトリックに変化するため、固有周期もこれに応じて変化する。Fig.2.6 に波上側形状が E_W の形状群を例として Heave 運動の RAO を示す。

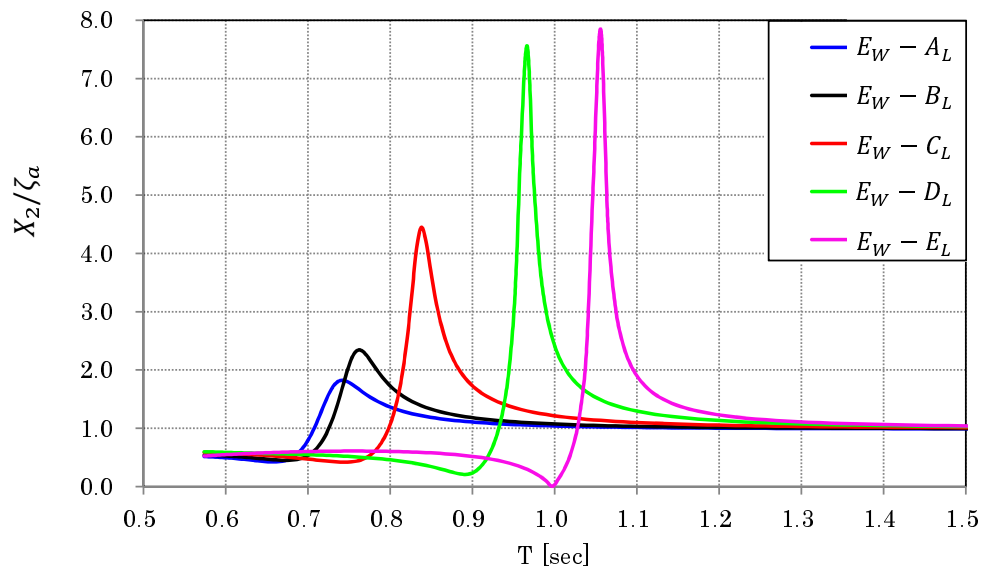


Fig. 2.6: RAOs of Heave motion.

8種類ある半断面形状の中で”A”の水線長が最も長く、”E”が最も短い。そのため、 $E_W - A_L$ から $E_W - E_L$ へと形状変化するにつれて固有周期は長周期側へと推移する。応答振幅の大きさは他モードとの連成、波強制力の大小および固有周期の長短等による影響がバランスすることによって変化する。固有周期の長短による影響とは、固有周期が短周期域にあると、ピークの応答振幅は小さくならなるとなり、固有周期が長周期域にあるとピークの応答振幅は大きくシャープになる傾向があることを指している。これは長周期域では減衰力係数が小さくなるため、そこに同調点があると応答が大きくなるためであり、この傾向は Fig.2.6 から確認することが出来る。これが評価値にどのように影響するか検討する。

Fig.2.7はRAOを波周期ベースで積分した結果と運動速度を考慮したHeaveの評価値 E_{Heave} を重ねて示している。RAOの積分値を見ると、波下側形状が C_L や G_L の時に若干大きな値を示しており、 E_L や F_L の時に少し小さくなる。これは E_L や F_L は固有周期における応答振幅は大きいですが、応答の大きな範囲が狭いためである。RAOの積分値と評価値を比較すると、波下側形状が C_L や G_L のときに若干大きな値を示しており、 E_L や F_L の時に少し小さくなるという傾向は大凡一致していることがわかる。ここでは示していないが、他の形状でもほぼ同様の傾向を確認している。すなわち、Heaveの評価値の高さは水線長によって変化するが、極端に長いものや短いものが良いとは言えないということが言える。

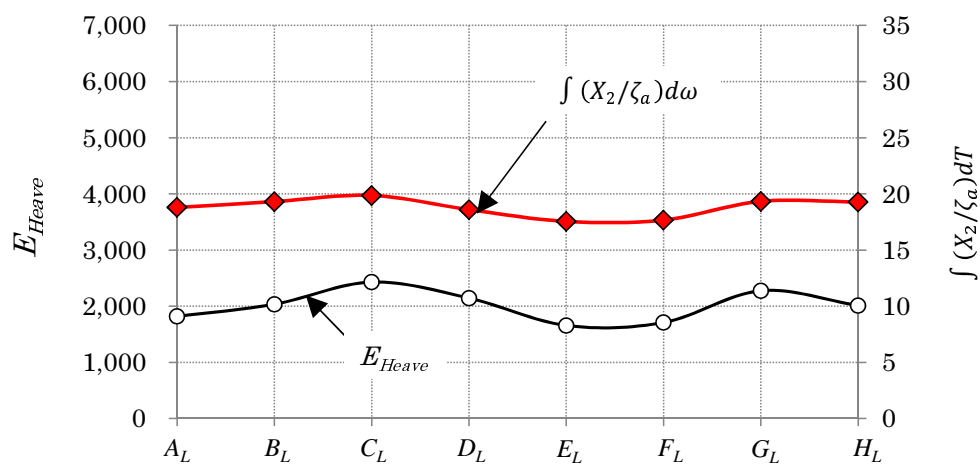
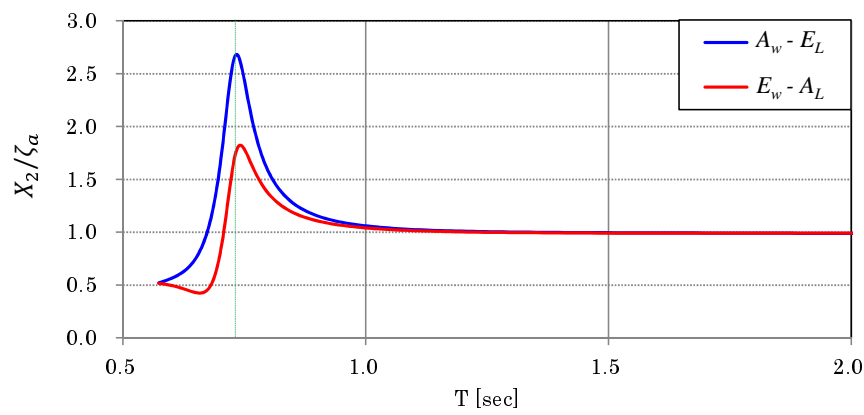


Fig. 2.7: Relationship of natural frequency and evaluation value.

2.1.4 波強制力の影響

Heave の評価値の高低に影響を与えるものとして、固有周期による影響の他に波強制力の影響がある。ここでは波強制力の大きさが評価値に与える影響について検討する。まず、形状 $A_W - E_L$ と $E_W - A_L$ を例として、Fig.2.8 に (a) Heave の応答振幅と (b) 波強制力の絶対値 $|F_{E2}|$ を示す。縦方向に引いた破線は Heave の固有周期 ($T = 0.73$) を示している。これらの形状は、左右で反転した形状であるため、Radiation 流体力係数や固有周期は同値である。

(a) Response amplitude operators of Heave motion



(b) Response amplitude operators of Wave exciting forces

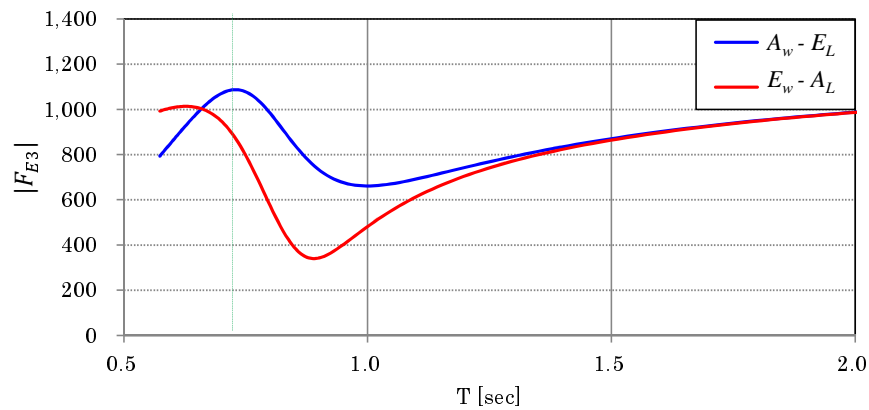


Fig. 2.8: RAO of Heave motion and exciting forces.

Fig.2.8 より固有周期 ($T = 0.73$) における応答の大きさを比較すると、 $A_W - E_L$ は $E_W - A_L$ に対しておよそ 1.6 倍大きく、波強制力 $|F_{E2}|$ では、 $A_W - E_L$ は $E_W - A_L$ に対しておよそ 1.3 倍大きい。この結果は、Radiation 流体力係数や固有周期が同値であれば、波強制力による影響で応答振幅が大きくなることためである。

一般的に、Heave 方向の波強制力 $|F_{E2}|$ が大きく、Radiation 流体力係数 $|T_{22}|$ が小さいと、Heave 運動の応答振幅は大きくなる。しかし、波強制力と造波減衰係数の関係は独立ではなく、波強制力が大きいとそれに伴って造波減衰係数も大きくなる。そのため、「固有周期での波強制力が大きいから応答振幅が大きい」イコール「評価が高い」という結論にはならない。そこで、固有周期における Heave 方向の波強制力 $|F_{E2}|$ を Radiation 流体力係数 T_{22} で除した値と Heave 運動の評価値の傾向を比較する。Fig.2.9 と Fig.2.10 に $|F_{E2}|/T_{22}$ と Heave 運動の評価値 E_{Heave} を示す。

		Lee side							
		A_L	B_L	C_L	D_L	E_L	F_L	G_L	H_L
Weather side	A_W	0.65	0.69	0.75	0.69	0.70	0.68	0.65	0.65
	B_W	0.60	0.63	0.73	0.69	0.70	0.67	0.63	0.62
	C_W	0.40	0.43	0.51	0.59	0.61	0.55	0.47	0.41
	D_W	0.22	0.21	0.20	0.27	0.29	0.25	0.19	0.23
	E_W	0.57	0.55	0.43	0.19	0.16	0.15	0.42	0.57
	F_W	0.55	0.53	0.37	0.17	0.20	0.16	0.36	0.55
	G_W	0.13	0.18	0.34	0.52	0.58	0.52	0.35	0.16
	H_W	0.62	0.66	0.72	0.70	0.72	0.69	0.64	0.62

Fig. 2.9: Comparison of $|F_{E2}|/T_{22}$ of the shapes obtained by inverting the weather and lee side.

		Lee side							
		A_L	B_L	C_L	D_L	E_L	F_L	G_L	H_L
Weather side	A_W	2,766	3,016	3,714	3,765	3,153	3,098	3,753	2,959
	B_W	2,927	3,238	4,014	3,901	3,183	3,147	3,909	3,172
	C_W	3,134	3,497	4,177	3,786	2,898	2,961	3,887	3,460
	D_W	2,415	2,693	3,251	2,846	2,077	2,203	3,016	2,672
	E_W	1,820	2,036	2,430	2,145	1,658	1,710	2,275	2,014
	F_W	1,869	2,083	2,517	2,330	1,817	1,846	2,385	2,054
	G_W	2,690	2,959	3,530	3,254	2,483	2,540	3,337	2,930
	H_W	2,893	3,195	4,003	3,963	3,252	3,197	3,941	3,125

Fig. 2.10: Comparison of E_{Heave} of the shapes obtained by inverting the weather and lee side.

Fig.2.9 および Fig.2.10 はそれぞれ固有周期での $|F_{E2}|/T_{22}$ および Heave 運動の評価値 E_{Heave} を示している。また背景にマーカーされた形状は、評価値を基に、ある形状とその左右で反転した形状を比較した際に、ある形状が大きな値を示した形状を示している。左右で反転した形状とは、すなわち表の対角線（左右対称形状）を挟んで線対称な位置関係にある形状を指している。例えば、Fig.2.9 では形状 $A_W - E_L(0.70)$ は対である形状 $E_W - A_L(0.57)$ に対して大きな値なので、 $A_W - E_L$ の欄はマーキングされており、 $E_W - A_L$ の欄は無地となる。また、マーキングされた形状を '+1'、無地の形状を '-1' とした場合、Fig.2.9 と Fig.2.9 の値をそれぞれ掛けたものを Fig.2.11 に示す。Fig.2.11 において '+1' となっているものは、左右で反転した形状同士を比較した際に、評価値の大小と $|F_{E2}|/T_{22}$ の大小が一致しているものを示しており、'-1' はこれらが一致していないものを示している。

		Lee side							
		A_L	B_L	C_L	D_L	E_L	F_L	G_L	H_L
Weather side	A_W		1	1	1	1	1	1	1
	B_W	1		1	1	1	1	1	1
	C_W	1	1		1	1	1	1	1
	D_W	1	1	1		-1	-1	1	1
	E_W	1	1	1	-1		1	1	1
	F_W	1	1	1	-1	1		1	1
	G_W	1	1	1	1	1	1		1
	H_W	1	1	1	1	1	1	1	

Fig. 2.11: Relationship of $|F_{E2}|/T_{22}$ and $E.V_H$ of the shape which is obtained by inverting the weather and lee side.

Fig.2.11 を見ると、形状 $D_W - E_L$, $D_W - F_L$ とそれらを反転させた 4 つの形状だけが '-1' となっていることが確認できる。これらの形状は、他の形状に比べて応答振幅の絶対量が比較的小さいため、波強制力の影響よりも、Heave 以外の運動からの連成影響等が支配的になったためと考えられる。この結果を纏めると、Radiation 流体力係数や固有周期が一致している形状同士で比較すると、多くの場合 $|F_{E2}|/T_{22}$ の大小が評価値に直結しているが、例外的な形状も存在するというを示している。

次に、全形状の Heave 方向の波強制力を Radiation 流体力係数で除した比 ($|F_{E2}|/T_{22}$) と E_{Heave} を比較する. その結果を Fig.2.12 および Fig.2.13 に示す.

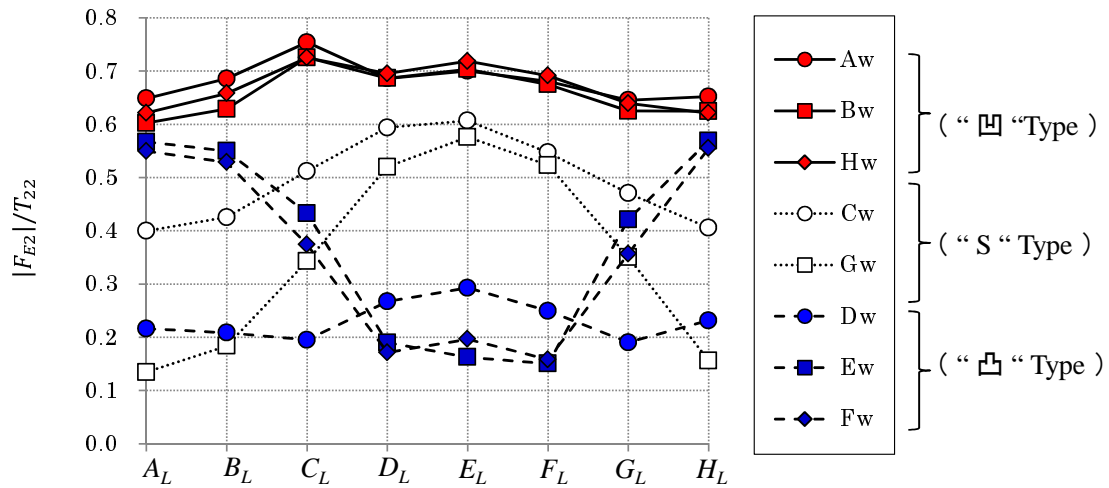


Fig. 2.12: Ratio of the T_{22} and $|F_{E2}|$ at natural period.

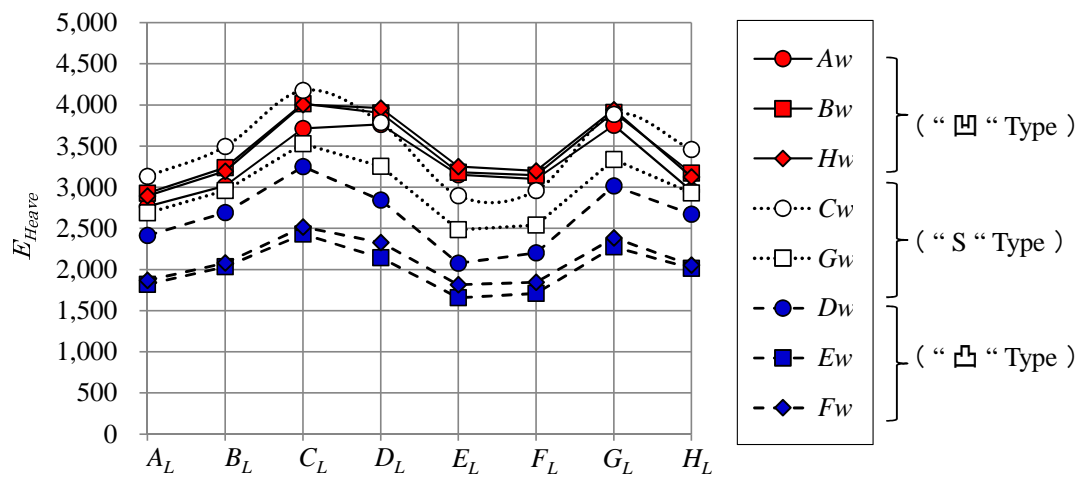


Fig. 2.13: Evaluation value of Heave motion.

Fig.2.12 は固有周期における $|F_{E2}|/T_{22}$ を波上側の形状毎にプロットしたもので、Fig.2.13 は E_{Heave} を波上側の形状毎にプロットしたものである。ただし、波上側の形状を凹型 (A_W, B_W, H_W), S 型 (C_W, G_W), 凸型 (D_W, E_W, F_W) のように 3 種類に分けて並べている。Fig.2.12 によると、波上側形状が凹型であると $|F_{E2}|/T_{22}$ が平均的に高く、0.6 から 0.8 に分布していることが確認できる。これらの形状群は固有周期と Radiation 流体力係数が同値の形状で比較したとき、大きな応答振幅が得られることが期待できる。次に Fig.2.13 の評価値をみると、波上側形状が何であっても波下側形状が C_L や G_L であると評価が高くなり、 A_L や E_L および F_L であると評価が低くなる傾向がある。この傾向を確認した上で、Fig.2.13 を見ると、いずれも必ずしも一致した傾向とは言い難いが、 $|F_{E2}|/T_{22}$ が平均的に高い (波上側形状が) 凹型の形状群は、評価値においても上位に占めている点で一致している。波強制力の大小によって評価値に影響を与えることは確かであるが、このような結果となった原因は、造波減衰係数の大小や固有周期の高低、他の運動との連成影響等による影響等が波強制力の影響よりも支配的になったためであると考えられる。

以上の考察をまとめると、運動エネルギー最大化を目的とした形状を探索する場合、Heave 運動が大きく、Heave と Roll の連成影響が強い形状が良い。また、Heave 運動の評価値の大小を決定する大きな要因として固有周波数による影響と波強制力の影響が挙げられるが、本研究における評価値の算定においては、固有周波数による影響の方がより重要であるといえる。

2.2 連成による影響

ここまで \overline{GM} を一定値としていたが、本節では特定の形状で \overline{GM} を変化させることにより Roll の固有周波数を変化させた場合について検討する。一般的に \overline{GM} が長くなると復原モーメントが大きくなり、回転運動の固有周期は短い方へと推移する。短周期域で Heave と Roll の固有周期を近づける事になるため、高い運動エネルギーが得られることが期待できる。形状 $A_W - E_L$ をモデルとして、 \overline{GM} は 0.01 から 0.40 の間で変化させた (ただし慣動半径は一定)。このときの Heave と Roll の応答振幅を Fig.2.14 に示す。

Fig.2.14 より、まず Roll の応答振幅に着目する。 $0.01 < \overline{GM} < 0.15$ の範囲では、 \overline{GM} が長くなるにつれて長周期側のピーク (Roll の固有周期) が短周期側へと推移していく様子が確認できる。 $\overline{GM} = 0.20$ で Heave によって起因するピークと Roll によって起因するピークが 1 つに統合され応答が大きくなる。さらに \overline{GM} を長く ($0.20 < \overline{GM} < 0.40$) すると、Roll の固有周期は短周期側への推移が鈍くなる。また、新たに長周期側に生じたピークが大きくなっていく様子も確認できる。一方、Heave 運動のピーク ($T = 0.73$) は $0.01 < \overline{GM} < 0.15$ の範囲で徐々に小さくなり、 $\overline{GM} = 0.15$ では Heave 固有周期 ($T = 0.73$) のピークはほとんど目立たないほど小さくなる。そして、Roll 運動との連成影響で生じた応答 ($T = 0.90$) が徐々に大きくなる。Roll 運動と Heave 運動が共に大きくなるのは、互いの運動の連成影響が強く、波に対する互いの同調運動が抑制された結果であると考えられる。

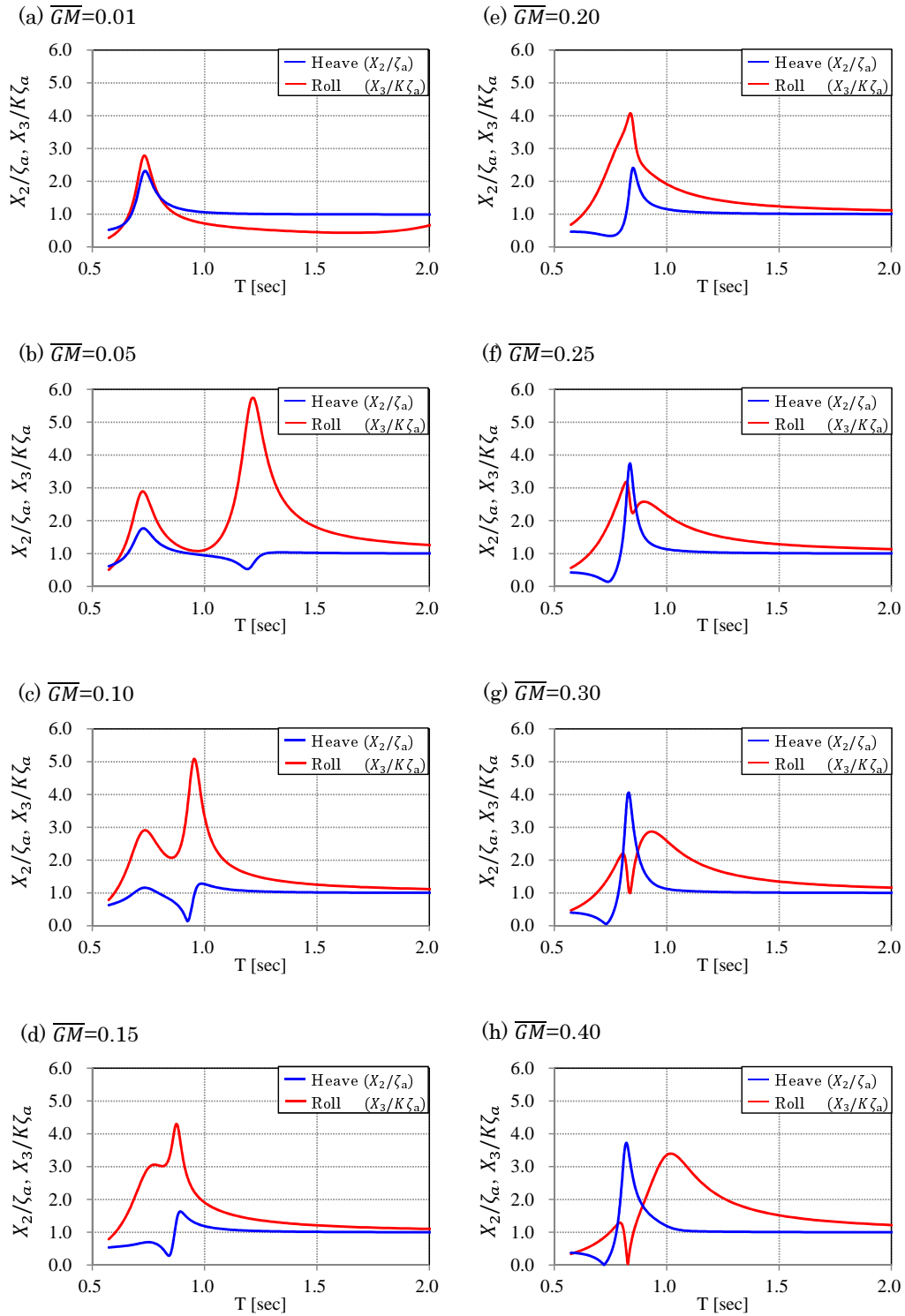


Fig. 2.14: RAO in case of changing the \overline{GM} .

ここで、 \overline{GM} が 0.25 よりも長い範囲で Roll 運動に新たに生じたピークの原因を検討する。Fig.2.15 は $\overline{GM} = 0.40$ の応答振幅で前述したものであるが、新たに Sway を加えた。問題としているピークは $T = 1.0$ に確認できるが、この点において Sway もピークとなっている。一般的に Sway には復原力がないため固有周期は存在しないが、Roll 運動との連成影響によって生じたものと考えられる。これは $\overline{GM} = 0.25$ および 0.30 でもほぼ同様の傾向を確認している。

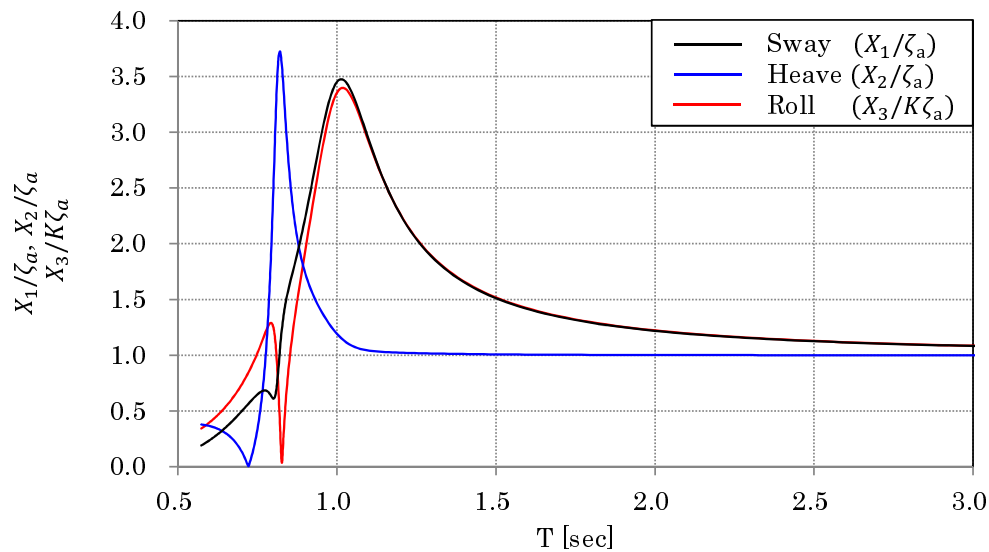
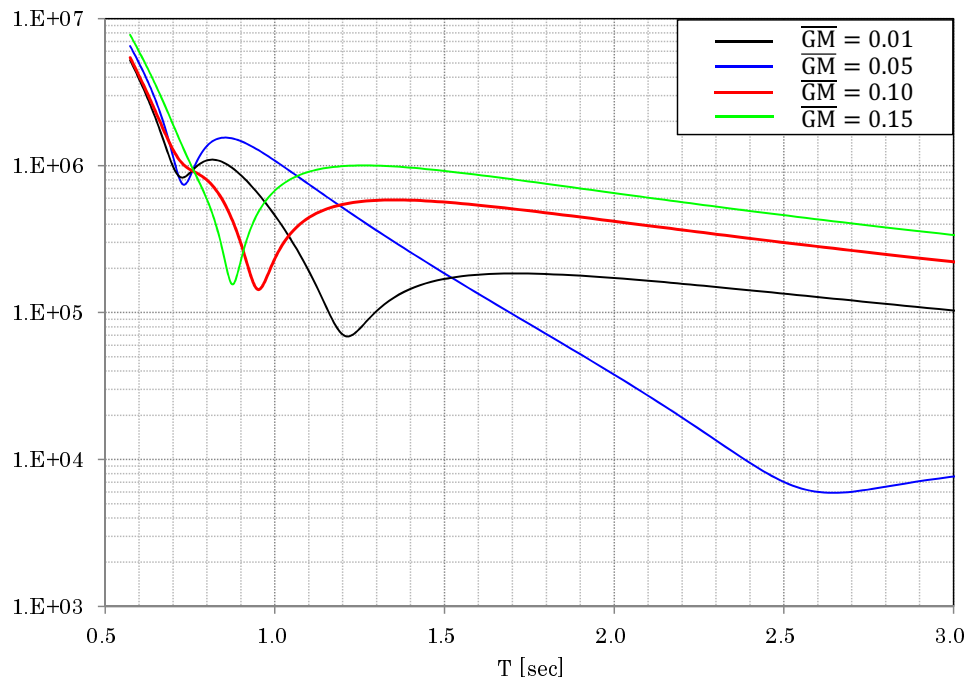


Fig. 2.15: RAO in case of changing the \overline{GM} (=0.40)

次に 1.2.2 節の (1.2) 式で示した運動方程式を利用して、固有周期の推移を確認する。すなわち (1.2) 式の左辺第一項の行列式を角周波数ごとにプロットすれば、Sway, Heave, Roll のいずれかがピークを示すとき、行列式は小さくなるため、極小値を探すことで固有周期の推移を確認することが出来る。 $0.01 < \overline{GM} < 0.40$ の範囲で角周波数ごとに行列式をプロットした結果を Fig.2.16 に示す。 $0.01 < \overline{GM} < 0.20$ の範囲では、Roll 運動に起因のピーク（長周期側）が \overline{GM} の増長につれて短周期側に推移していく様子が確認できる。特に、 $\overline{GM} = 0.15, 0.20$ では Heave 運動に起因のピークは徐々に小さくなり、ピークは一つにまとまっていく様子も確認できる。また、 $\overline{GM} = 0.25, 0.30$ では確認し難いが $\overline{GM} = 0.40$ では Sway との連成影響で生じたピーク ($\omega = 6.1$) が明確に現れている。

(a) $\overline{GM} = 0.01, 0.05, 0.10, 0.15$



(b) $\overline{GM} = 0.20, 0.25, 0.30, 0.40$

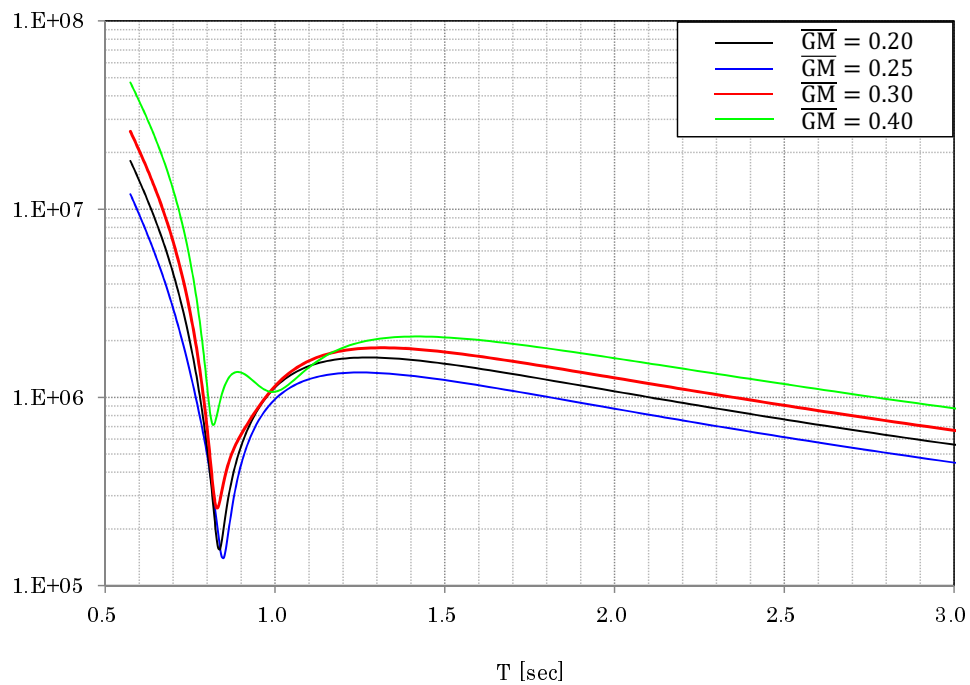


Fig. 2.16: Transition of the tuning period in case of changing \overline{GM} .

最後に、 \overline{GM} を $0.01 < \overline{GM} < 0.40$ の範囲で変更したときの評価値を Fig.2.17 に示す。Fig.2.17 によると、Roll の評価値 E_{Roll} は $0.01 < \overline{GM} < 0.1$ の範囲で増加傾向であり $\overline{GM} = 0.10$ で最大となるが、さらに \overline{GM} を長くした $0.1 < \overline{GM} < 0.4$ の範囲では減少傾向に転じる。一方、Heave の評価値 E_{Heave} は Roll とは対照的で $0.01 < \overline{GM} < 0.15$ の範囲で減少傾向にあり、 $\overline{GM} = 0.15$ で最小値、 $0.15 < \overline{GM} < 0.4$ の範囲で増加傾向になる。Roll 運動と Heave 運動が両者共に大きくなる原因は既に前述したが、互いの運動の連成影響が強く、波に対する互いの同調運動が抑制された結果であると考えられる。結局これらを合算した総合評価 $E.V$ は、 $\overline{GM} = 0.10$ で最高評価(約 6,500)となるが、 $\overline{GM} = 0.01$ の総合評価(約 5,000)と比較しておよそ 1.3 倍程度の増加に留まった。

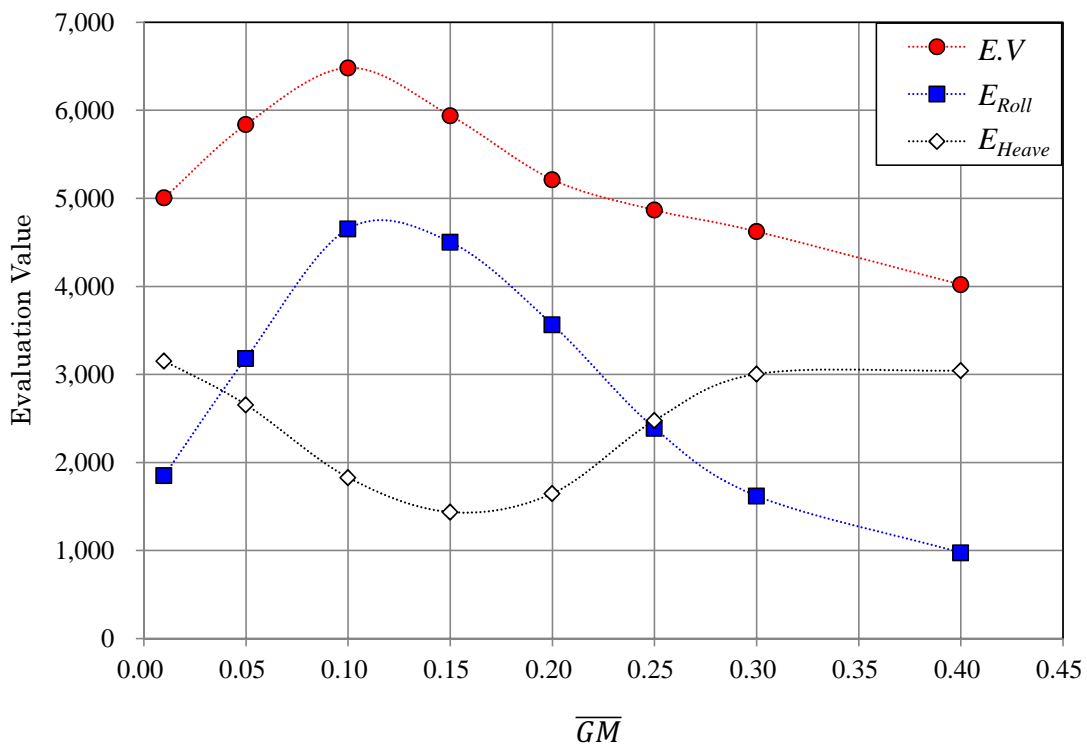


Fig. 2.17: Evaluation value in case of changing the \overline{GM} .

以上の結果をまとめると，Roll と Heave の固有周期を接近させることで運動エネルギーの増加を図ったが，想定した程の効果は得られなかった．これは，両運動の連成影響が強く，波に対する互いの同調運動が抑制されたためと考えられる．

第3章 評価手法に関する検討

序論でも述べたが、波力発電は世界的に見ても未だに実現した例はなく、研究段階に留まっているというのが現状である。実現例が無いこともあり、波力発電装置としての性能を評価する手法もまた確立しているとはいえない。発電装置が対象であるため、実機で検証する前段階（小型模型を用いた水槽実験等）から発電機構を設けて、発電量で直接的に評価する手法をとることが理想的である。しかしながら、実機を想定した発電機構は、構造的に小型化することが困難であるため、水槽実験で用いる規模の模型に搭載することができず、発電量を測定することが困難である。そのため現状では、実機での実験を除けば、発電量で評価することはなく、ある適当な手法で代替的に評価することが多い。中でも、入射波と反射波の波エネルギー収支から、浮体の蓄えるエネルギーおよび波エネルギー吸収効率を算定する手法が一般的である。ただし、入出する波エネルギーの差分が「発電エネルギー」と等価となることは、当然考え難く、波エネルギー吸収効率の良い形状が、波力発電装置として優れているのかも不明である。

そこで、本研究では、代替的に用いられている「波エネルギー収支によって評価する」手法と、「エネルギー吸収機構の吸収する吸収量で評価する」手法、また、参考として「応答振幅の大きさを評価する」手法および「運動エネルギーで評価する」手法も加え、それぞれの場合において評価の高い形状を比較することにより、波力発電装置を評価することに対する、代替手法の妥当性について検討する。

3.1 浮体形状の評価手法

ここでは、本研究において比較検討に用いた評価手法について述べる。以下の4種類が本研究で検討した評価手法である。

- 1) 波エネルギー収支で評価する手法
- 2) 応答振幅の大きさを評価する手法
- 3) 運動エネルギーで評価する手法
- 4) エネルギー吸収機構の吸収量で評価する手法

以下に、各評価手法の詳細を述べる。

1) 波エネルギー収支で評価する手法

前記したとおり，浮体式波力発電装置を評価する手法として最も一般的な手法で，入射波と反射波の波エネルギー収支から，発電機構や浮体等が蓄えるエネルギーを算定する手法である．Fig.3.1のように，無限遠方に浮体を取り囲む検査面を想定し，入射波振幅 ζ_a に対して浮体によって反射し，波上側の検査面から出ていく反射波振幅を ζ_R ，波下側から出ていく透過波振幅を ζ_T とする．

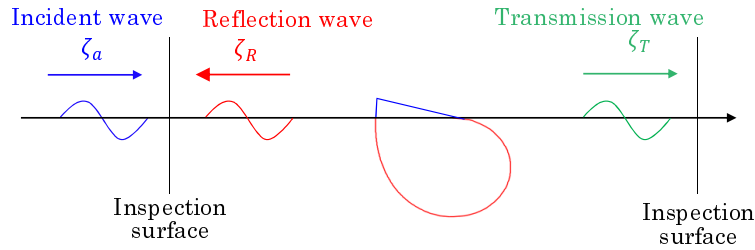


Fig. 3.1: Reflection and transmission waves by a floating body.

波エネルギーを吸収する機構がない場合では，エネルギー保存則により (3.1) 式の関係が成り立つ．

$$|\zeta_R(T)|^2 + |\zeta_T(T)|^2 = |\zeta_a|^2 \quad (3.1)$$

波エネルギーを吸収する機構が存在する場合は，この関係は成り立たず，差分が発電機構が吸収するエネルギーや浮体の運動エネルギーとなる．そのため，(3.2) 式のようにエネルギー吸収効率 $\eta(T)$ を算定出来る．

$$\eta(T) = 1 - \{|\zeta_R(T)|^2 + |\zeta_T(T)|^2\} / |\zeta_a|^2 \quad (3.2)$$

本研究では，(3.3) 式に示すとおり，エネルギー吸収効率 $\eta(T)$ と波スペクトル $\phi_{\zeta\zeta}(T)$ の積を波周期に関して積分した値 EV_1 (Evaluation Value 1)を用い，これが最大のものを最適形状とする．

$$EV_1 = \int_{T_a}^{T_b} \{\eta(T)\phi_{\zeta\zeta}(T)\} dT \quad (3.3)$$

2) 応答振幅の大きさを評価する手法

これは、浮体運動の応答振幅を波周期に関して積分した値で評価する手法であり、一般的にいわれる「浮体運動の大きな形状」が高く評価される。「浮体運動の大きな形状」すなわち「可動物体型発電装置に適している」のかを検討する。

運動の評価は、復原力のある Heave(X_2) と Roll(X_3) に関して考えるものとする。これらの応答振幅は、入射波振幅 ζ_a と無限水深での波数 $K(= \omega^2/g)$ を用いて無次元化した値を用いるものとする。Heave と Roll の応答振幅の和と波スペクトルとの積を波周期に関して積分した値を評価値 EV_2 (Evaluation Value 2) とし、これが最大のを最適形状とする。

$$EV_2 = \int_{T_a}^{T_b} \left\{ \left(\frac{X_2}{\zeta_a} + \frac{X_3}{K\zeta_a} \right) \phi_{\zeta\zeta}(T) \right\} dT \quad (3.4)$$

3) 運動エネルギーで評価する手法

これは、「2) 応答振幅の大きさを評価する手法」に関連した手法であり、振動速度を考慮した評価手法である。浮体運動の応答振幅から運動エネルギーの周波数応答関数を求め、これを波周期に関して積分した値で評価する。浮体運動の応答速度の2乗が大きい形状が高く評価されるため、「浮体の運動としてため込むエネルギー量が大きい形状」が高く評価されることになる。

Heave と Roll の運動エネルギーは以下のように表現する。

$$E_{Heave}(T) = \frac{1}{2} m_0 \left(\frac{X_2}{\zeta_a} \omega \right)^2 \quad (3.5)$$

$$E_{Roll}(T) = \frac{1}{2} m_0 \kappa^2 \left(\frac{X_3}{\zeta_a} \omega \right)^2 \quad (3.6)$$

ただし、(3.5)、(3.6) 式中の m_0 は浮体質量、 κ は Roll 方向の慣動半径であり、これらは実験値を参考にして適当な値を用いた。Fig.3.2(a) はある形状の運動応答の周波数応答関数を例として示しており、Fig.3.2(b) は (3.5)、(3.6) 式により運動応答振幅と振動速度から運動エネルギーを算定した結果である。角周波数 ω をかけているため、短周期側にあるピークが顕著となり、長周期側にあるピークは小さく目立たなくなる。評価値 EV_3 (Evaluation Value 3) は、(3.7) 式に示すとおり、Heave 方向と Roll 方向の運動エネルギーの和をとり、これと波スペクトルの積を周期に関して積分した値とする。この評価値が最大となる形状を最適形状とする。

$$EV_3 = \int_{T_a}^{T_b} \left[\{ E_{Heave}(T) + E_{Roll}(T) \} \phi_{\zeta\zeta}(T) \right] dT \quad (3.7)$$

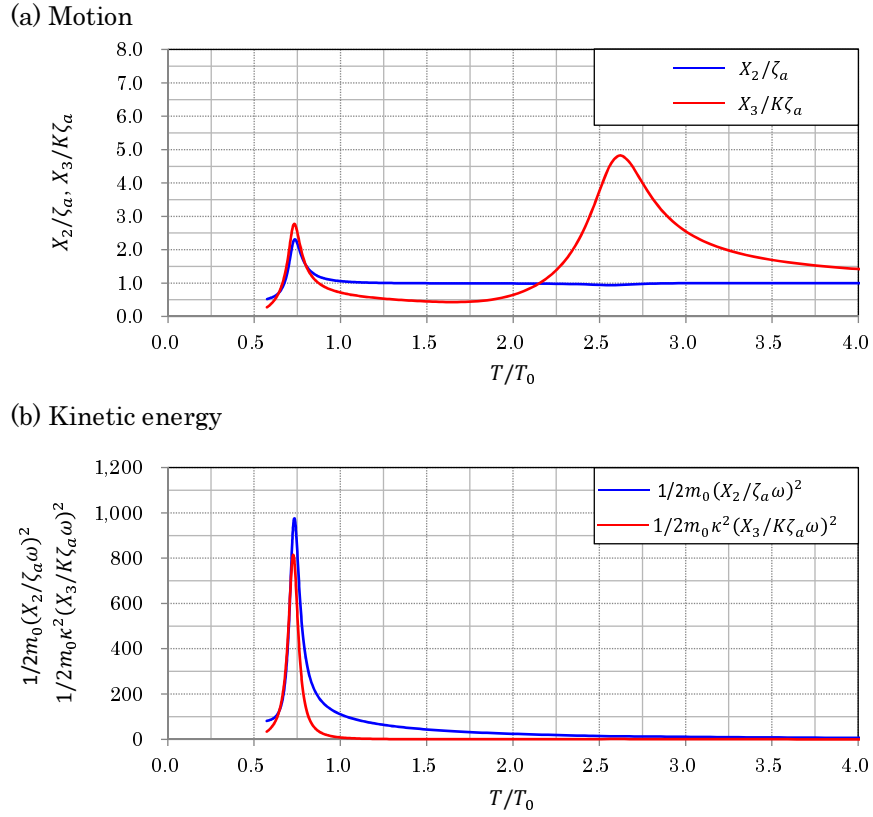


Fig. 3.2: RAO of the floating body's motion and the kinetic energy.

4) エネルギー吸収機構の吸収量で評価する手法

この評価手法は、波浪発電装置を想定する場合において、本研究で設定した評価手法の中で最も直接的に評価する手法である。

エネルギー吸収機構として様々なものが候補としてあるが、本研究では、一例として Fig.3.3 に示すような、振子型のエネルギー吸収機構を想定する。

Fig.3.3 にある ψ は、 Z 軸に対する振子の振れ角である。これは、浮体の運動とは別に自由度を設けて浮体運動と連成させる。すなわち、

$$\begin{pmatrix} m_p & 0 & -m_p l_0 & m_p r_0 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{X}_1 \\ \ddot{X}_2 \\ \ddot{X}_3 \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & -m_p g \\ 0 & C_{22} & C_{23} & 0 \\ 0 & C_{32} & C_{33} - m_p l_0 g & -m_p l_0 g \\ 0 & 0 & 0 & -m_p g \end{pmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ \psi \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (3.8)$$

$$EV_4 = \int_{T_a}^{T_b} \{P(T)\phi_{\zeta\zeta}(T)\}dT \quad (3.11)$$

以上，これまでに述べた4種類の手法を用いて形状評価する．ただし，エネルギー吸収機構は浮体運動と連成するため，評価手法によってエネルギー吸収機構の有無を変更しては公平な評価とはならない．そのため，いずれの手法においても，エネルギー吸収機構の搭載を想定して計算するものとする．

最後に，4種類の評価手法において共通して用いた不規則波スペクトル $\phi_{\zeta\zeta}(T)$ についてであるが，本研究では，ITTC（国際試験水槽会議）スペクトルを基に作成した．(Fig.3.4)

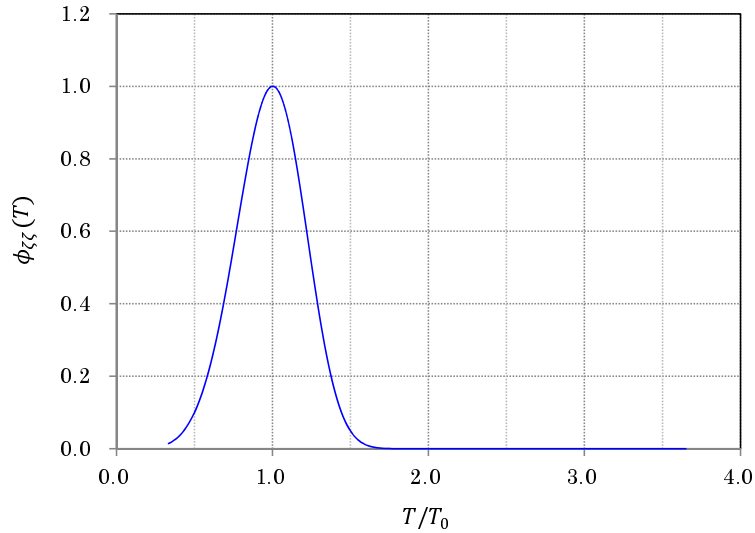


Fig. 3.4: Wave spectrum used in common to the four evaluation methods.

本研究で扱う ITTC スペクトルは，波浪情報として，有義波高の情報のみで決定できるものを採用した．これは以下の式により表される．

$$\phi_{\zeta\zeta}(\omega) = 8.1 \times 10^{-3} \cdot g^2 \cdot (\omega)^{-5} \cdot \exp\{-3.11/(H_{1/3})^2 \cdot \omega^4\} \quad (3.12)$$

$$\phi_{\zeta\zeta}(\omega)_{max} = \phi_{\zeta\zeta}(\omega_0) \quad (3.13)$$

(3.12) 式中の g は重力加速度， ω は入射波の円周波数， $H_{1/3}$ は有義波高である．ただし，各評価手法に用いたものは，Fig.3.4 に示すように，横軸はピークの周期 T_0 で無次元化し，縦軸はピーク高さが1になるように無次元化したものとした．

3.2 浮体形状の設定方法

ここでは、評価手法の検討に用いた浮体形状の設定方法について述べる．前記したように、本研究での浮体形状の取り扱いは、2次元問題とするが、それでも形状の種類は無限に近い数が存在する．そこで、Fig.3.5のように、複数個の設計変数（Node：Fig.3.5では B_0^+ , B_1^+ , ..., B_4^+ を指す）を波上側および波下側でそれぞれ設定（X軸方向は0から7または-7から0の整数，Z軸方向は水面から喫水深さまで等間隔）し、その間を直線，または曲線で補完することにより、浮体の側面形状を形成する．浮体底部は、波上側および波下側における最深部の設計変数 B_N^- と B_N^+ を直線で繋ぐことで形成する．また、本研究では、形状の特徴を比較し易くすることを目的として、水面下の断面積が一定となるように伸縮調整した．

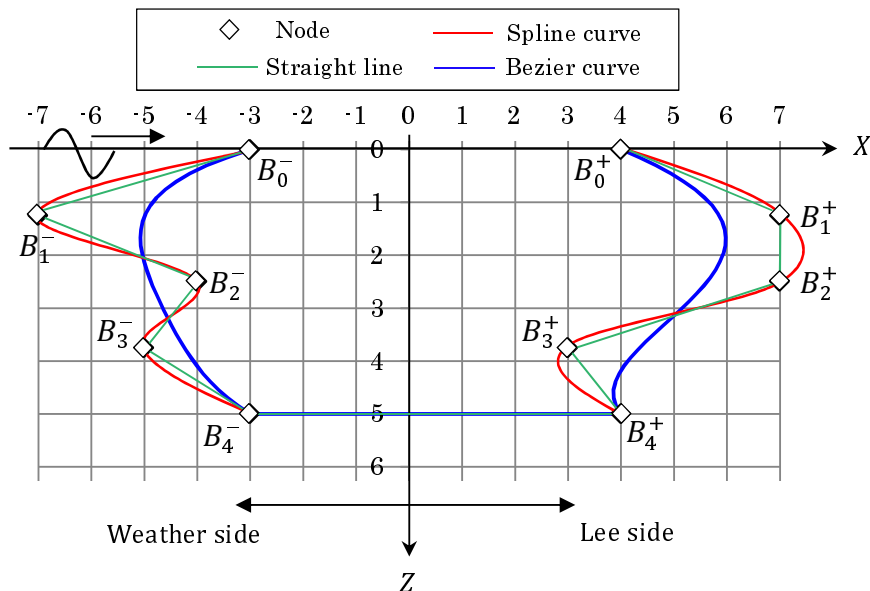


Fig. 3.5: Design method of the floating body shape.

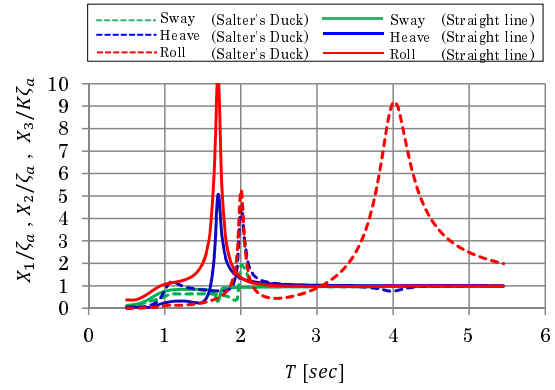
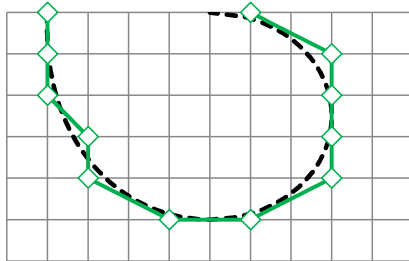
側面形状の補完方法について、Fig.3.5では、隣り合う設計変数の間を直線，Spline曲線およびBezier曲線で補完した例を示している．補完する方法の優劣をつけることは難しいが、全てを検討することは、本研究の目的を考えるとあまり意味が無いと考える．そこで、補完方法に関しては、これら3種類のうちから1種類を選定することとした．選定の基準としては、形状探索の範囲に最も吸収効率が高い形状といわれるSalter's Duck形状が含まれること．かつ、これを少ない設計変数で再現できるものを選定することとした．

Fig.3.6 から Fig.3.9 には，モデルとした Salter's Duck 形状と，直線，Spline 曲線および Bezier 曲線でそれぞれ補完した形状図および各形状の運動の周波数応答関数を示す．ここでは，設計変数の数は 12，10，8，6 とした場合を例示している．なお，モデルとした Salter's Duck 形状に最も近いものであるかの判定は，浮体形状を形成する点の数を統一し，各点の間の距離の標準偏差を評価し決定した．

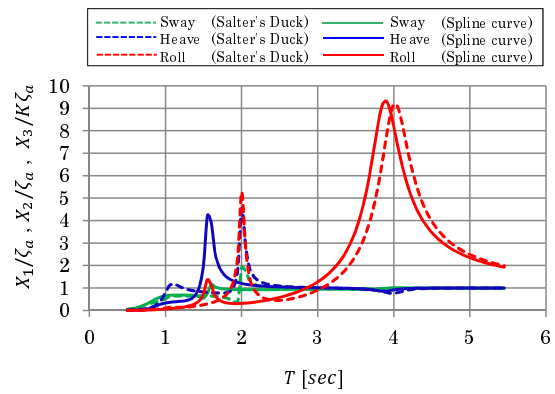
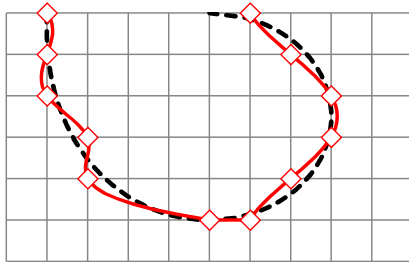
まず，Fig.3.6 から Fig.3.9 より各運動の固有周期に着目する．モデルとした Salter's Duck 形状の Heave の固有周期は 2.0[sec] の辺りにあるが，これに良く合致しているのは，Bezier 曲線で補完した，設計変数が 12 点，10 点，6 点のもの，および Spline 曲線で補完した，設計変数が 10 点のもの 3 形状である．Heave の固有周期は，水線長で大凡決定される．Fig.3.6 から Fig.3.9 の形状図に着目すると，Heave の固有周期が合致していた 3 形状では，水線長を決定する水線上の設計変数が，Salter's Duck 形状とほぼ合致していることがわかる．

以上の結果より，Bezier 曲線，Spline 曲線が候補なるが，設計変数の数が 6 点と最も少なく，Salter's Duck 形状を再現できる Bezier 曲線を採用することとした．

(a) Strait Line, Node : 12



(b) Spline Curve, Node : 12



(c) Bezier Curve, Node : 12

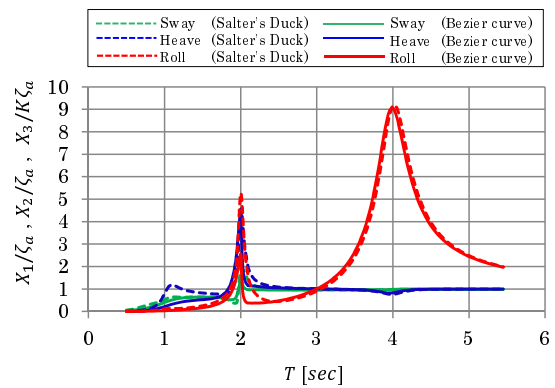
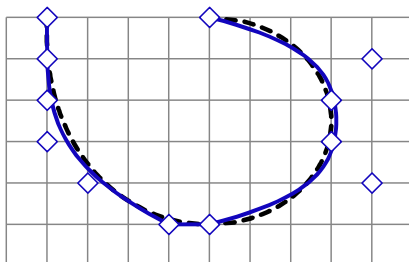
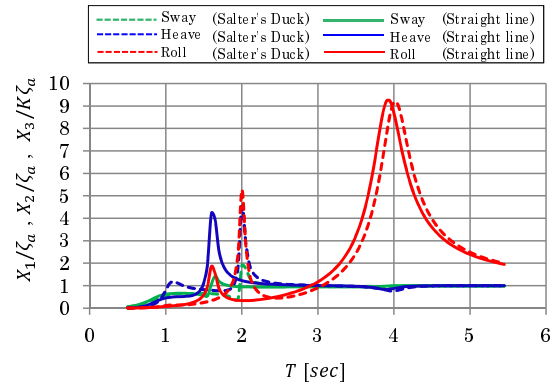
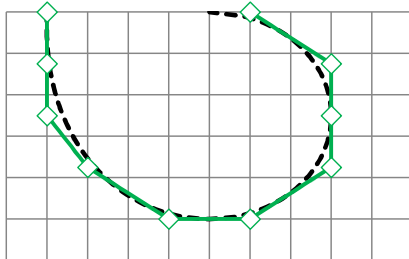
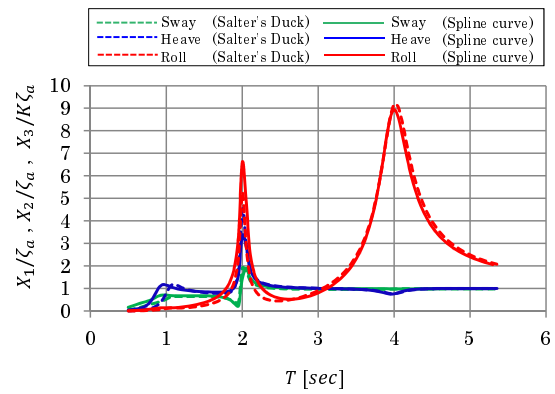
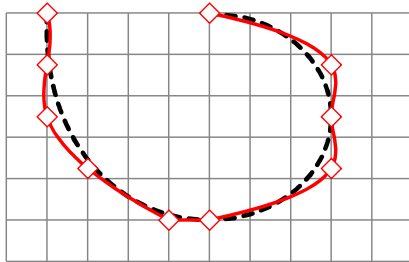


Fig. 3.6: Comparison of each complement methods -12 Nodes-.

(a) Strait Line, Node : 10



(b) Spline Curve, Node : 10



(c) Bezier Curve, Node : 10

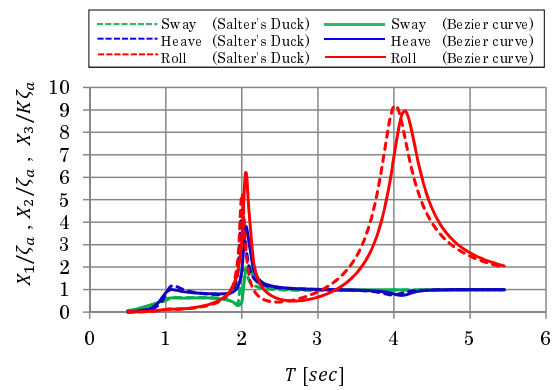
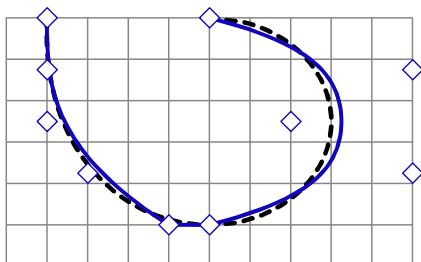
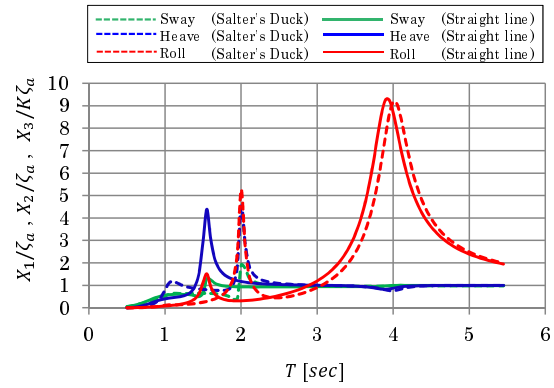
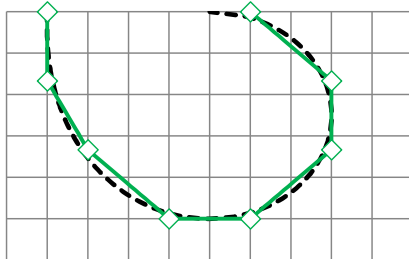
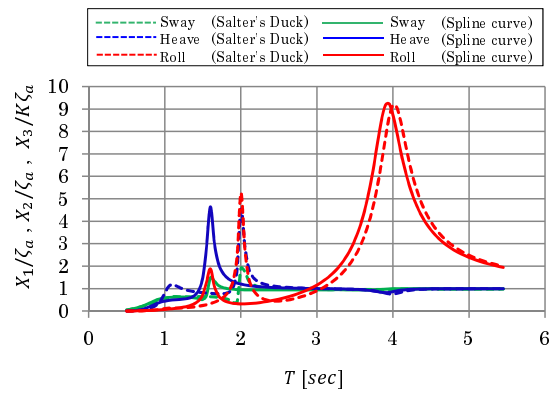
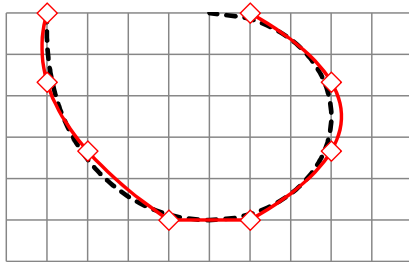


Fig. 3.7: Comparison of each complement methods -10 Nodes-

(a) Strait Line, Node : 8



(b) Spline Curve, Node : 8



(c) Bezier Curve, Node : 8

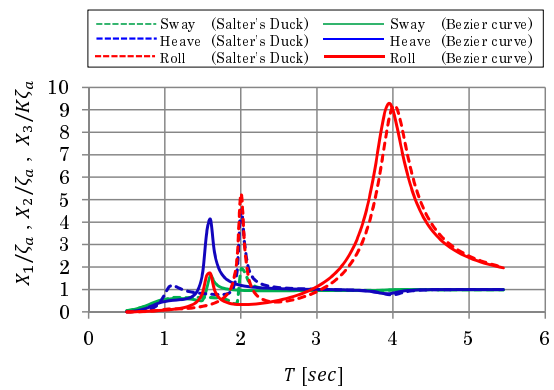
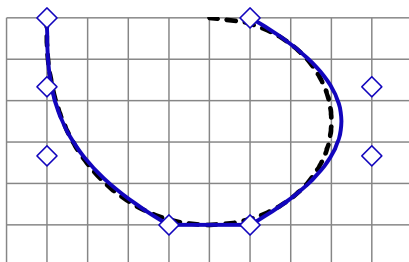
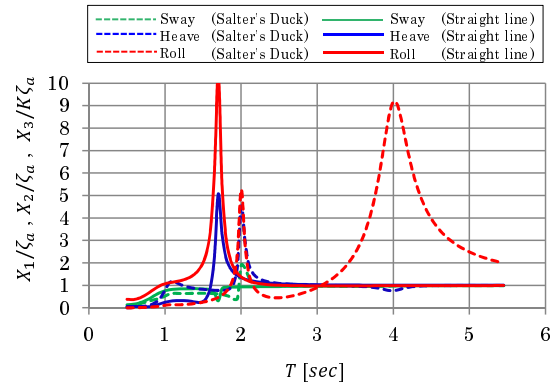
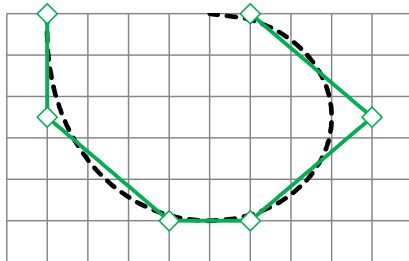
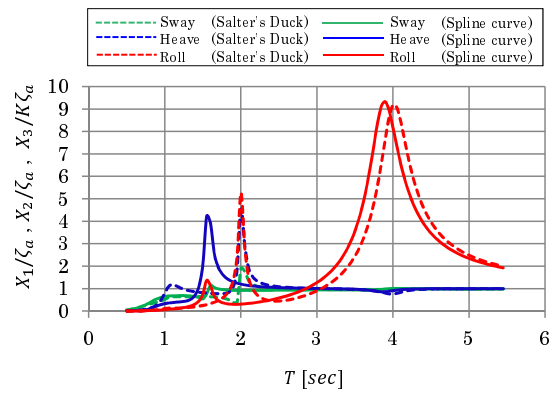
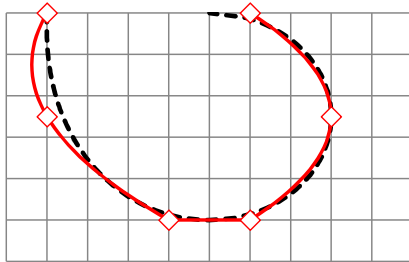


Fig. 3.8: Comparison of each complement methods -8 Nodes-.

(a) Strait Line, Node : 6



(b) Spline Curve, Node : 6



(c) Bezier Curve, Node : 6

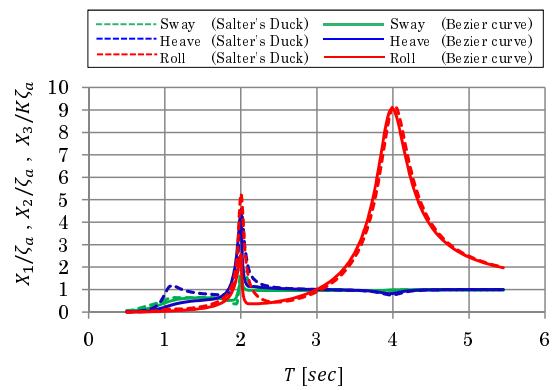
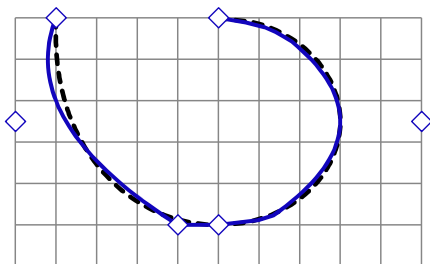


Fig. 3.9: Comparison of each complement methods -6 Nodes-.

3.3 評価手法と最適形状の変化

本節では、3.1節で述べた4種類の評価手法において、それぞれで得られた最適形状を比較検討した結果について述べる。

Table 3.1 に浮体運動と GA の計算に必要な諸パラメータを示す。ここでは、没水部の断面積 S が一定となるように調節して形状比較を行った。 \overline{GM} と慣動半径 κ は没水部断面積 S の平方根との比で与えた。これらは前記した水槽実験で用いた浮体の実測値を参考にして設定した。

Table 3.1: Calculation conditions to consider the evaluation methods.

Parameters related to floating body	Value
Number of the floating body	1
S [m^2]	1
\overline{GM}/\sqrt{S}	0.22
κ/\sqrt{S}	1.58
Mesh number	100
Parameters related to evaluation	Value
m_p/M [%] (m_p :mass of the pendulum, M :mass of the floating body mass)	3.0
l_0/\sqrt{S} [%] (l_0 :The height of the pillar)	1.0
r_0/\sqrt{S} [%] (r_0 :The length of the pendulum arm)	0.5
Minimum period T_a ($= T/T_0$)	0.5
Maximum period T_b ($= T/T_0$)	3.0
Parameters related to GA	Value
Number of bodies per generation	300
Number of generation	20
Number of duplicates [%]	3.0
Number of design variables per a body	6
Crossover occurrence rate[%]	50.0
Mutation occurrence rate[%]	10.0

Fig.3.10 は 3.1 節で述べた 4 種類の評価手法において、それぞれ得られた最適形状 (没水部) を示している。形状名は評価手法ごとに区別して「波エネルギー収支で評価 : Body "A"」、「応答振幅の大きさで評価 : Body "B"」、「運動エネルギーで評価 : Body "C"」、「エネルギー吸収機構の吸収量で評価 : Body "D"」としている。また、Fig.3.11 に各形状の無次元化した応答振幅 (Sway, Heave, Roll) を示す。

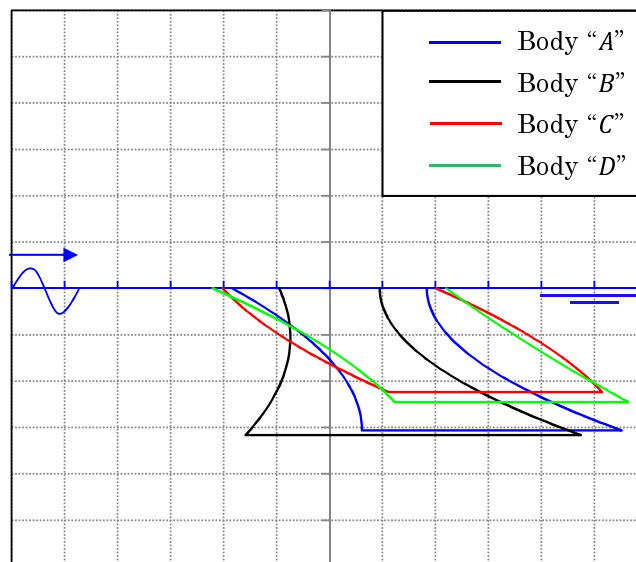


Fig. 3.10: Difference of the optimal shape obtained by various evaluation methods.

Fig.3.10 をみるとわかるとおり、今回検討した 4 種類の評価手法では、最適形状がそれぞれ異なる結果となった。Body "A" は、「波エネルギー収支で評価」した場合の最適形状であるが、波下側と波上側の両側面の形状とも、水深方向に対して波下側の方向 (紙面右側) に向かって伸びていくような形状の特徴がある。このような特徴は Body "C" や Body "D" にも共通して確認でき、かつこれら 3 形状の水線長は大凡等しいこともわかる。

水線長は Heave の固有周期に大きく影響するため、Fig.3.11 に示すように、これらの Heave の固有周期はほぼ等しい周期 ($T/T_0 = 1$ 近傍) にある。一方、Body "B" は他形状に対して水線長が短く、Heave 固有周期は比較的長い ($T/T_0 = 1.6$)。

Body "D" が本研究の中で唯一、エネルギー吸収機構の吸収量で評価しているため、これが最も発電装置の形状として優れているといえる。そのため、Body "B" が最適と評価した「応答振幅の大きさで評価」は波力発電の評価手法としては妥当ではないといえる。その他の手法に関しては、全く同一ではないが、傾向分析としては、代替手法として妥当であるといえる。

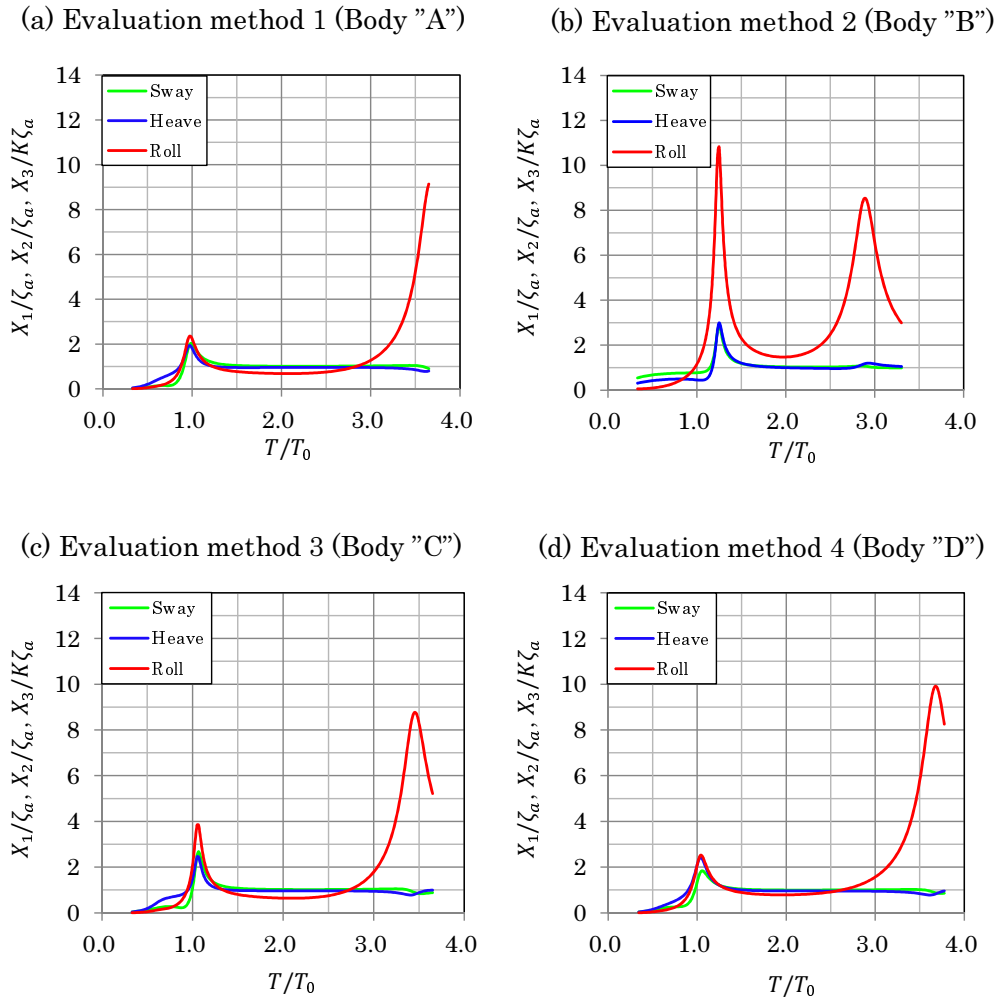


Fig. 3.11: Response Amplitude Operators of the optimal shapes in different evaluation method.

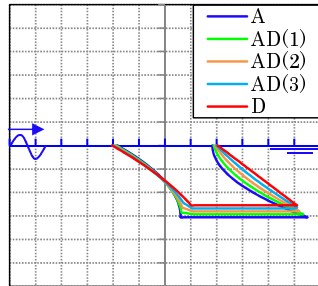
Body”B”を除いた他の形状（Body”A”，”C”および”D”）は形状的に類似した特徴を示していると述べたが，同一形状とはならなかった．この原因として，以下の2通りが考えられる．

- ① 本研究における浮体形状の設定方法では形成できないが，Body”A”，”C”および”D”に類似したさらに性能の高い形状が別に存在する
- ② 本研究で設定した評価手法では，評価手法ごとに適した形状がそれぞれ存在する

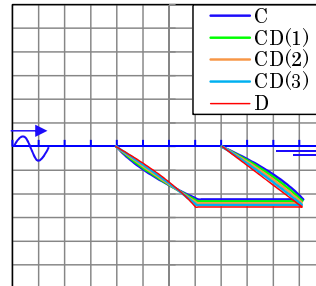
これについて検討するため、Body”A”から”D”、Body”C”から”D”へ徐々に形状を変化させて、変化の過程における評価値の変化を観察した。ここでは、対象とした形状の評価手法を用いることとし、「波エネルギー収支で評価：EV₁」、「運動エネルギーで評価：EV₃」、「エネルギー吸収機構の吸収量で評価：EV₄」とした。この結果を Fig.3.12 に示す。

Fig.3.12 の左側 (a-1) から (a-4) は Body”A”から”D”へと形状変化した場合、右側 (b-1) から (b-4) は Body”C”から”D”へと形状変化した場合の結果を示している。2 段目の (a-2), (b-2) は「波エネルギー収支で評価」した時の波エネルギー吸収効率 $\eta(T)$ および評価値 EV_1 、3 段目の (a-3), (b-3) は「運動エネルギーで評価」した時の Heave, Roll の運動エネルギーの総和および評価値 EV_3 、4 段目の (a-4), (b-4) は「エネルギー吸収機構の吸収量で評価」した時の吸収機構の仕事率 $P(T)$ および評価値 EV_4 である。

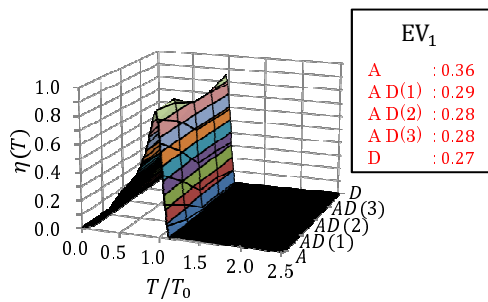
(a-1) Body "A" ~ Body "D"



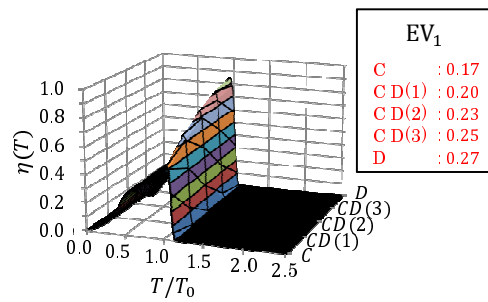
(b-1) Body "C" ~ Body "D"



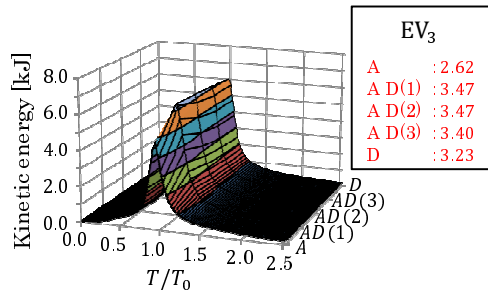
(a-2) $\eta(T)$ and EV_1 (Body "A" ~ Body "D")



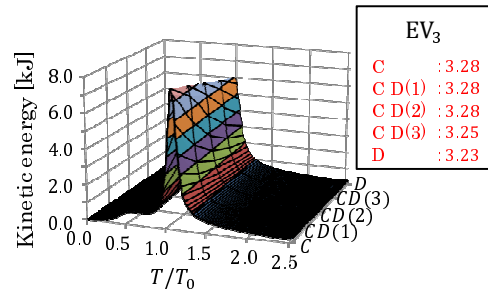
(b-2) $\eta(T)$ and EV_1 (Body "C" ~ Body "D")



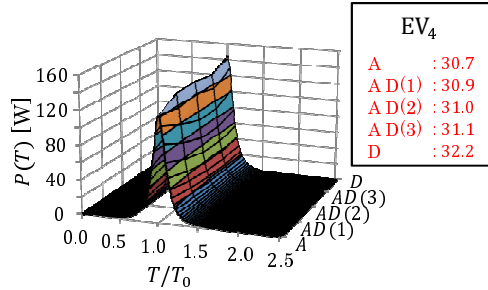
(a-3) Kinetic energy and EV_3 (Body "A" ~ Body "D")



(b-3) Kinetic energy and EV_3 (Body "C" ~ Body "D")



(a-4) $P(T)$ and EV_4 (Body "A" ~ Body "D")



(b-4) $P(T)$ and EV_4 (Body "C" ~ Body "D")

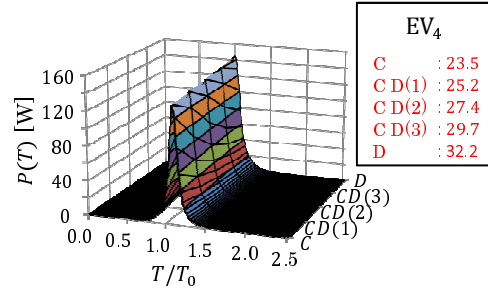


Fig. 3.12: Changes in the EV_1 , EV_3 and EV_4 in case of changing the shape by morphing.

①について

形状変化の過程で、いずれの評価手法においても Body”A”や”D”あるいは、Body”C”や”D”よりも評価の高い形状が存在すれば、仮定①が実証されることになる。Fig.3.12 の (a-2) から (a-4) および (b-2) から (b-4) でそのような形状を探すと、(a-3)「運動エネルギーで評価」した場合での Body”AD(1)”, ”AD(2)”, ”AD(3)”が Body”A”や”D”よりも評価が高い。Body”A”や”D”の評価値が $EV_3 = 2.62, 3.23$ であるのに対して、Body”AD(1)”や”AD(2)”は、 EV_3 が 3.47 で、Body”AD(3)”は EV_3 が 3.40 であった。ただし、その他の (a-2) や (a-4) ではこの傾向が確認できないため、①を実証するには不十分である。

(a-3)「運動エネルギーで評価」した場合においてのみ、中間形状の評価が高くなったのは、評価手法の違いによる特有なものではなく、形状変化の方法によるものと考えられる。まず、「評価手法の違いによって特有なものではない」としたのは、Fig.3.12 の Body”C”から”D”に形状変化した場合での (b-3) では、Body”C”が $EV_3 = 3.28$ で最も高く (Body”CD(1)”, ”CD(2)”も同値), ”CD(3)”, ”D”の順に評価が下っていくため、中間形状が Body”C”や”D”よりも評価の高い形状となっていないためである。また、「形状変化の方法による」としたのは、今回は Body”A”と”D”あるいは Body”C”と”D”の間を等間隔に変化させた場合のみ示しているが、例えば波上側あるいは波下側の一部だけを変化させる等のように、工夫次第でさらに評価の高い形状が得られることも十分に考えられるためである。

②について

評価手法ごとに適した形状がそれぞれ存在することを実証するためには、評価手法ごとに順位の入替えが起こっていることを確認できればよい。まず、右側のグラフ (Body”C”→”D”) から先に着目する。Body”C”から”D”へと形状変化する間の評価値をみると、(b-2) および (b-4) は単調増加、(b-3) は単調減少していることがわかる。(b-2) と (b-4) の評価手法では、Body”C”より Body”D”の方が評価が高いことで一致している。一方、左側のグラフ (Body”A”→”D”) の評価値をみると、(a-4) では Body”A”から”D”に向かって単調増加しているが、(a-2) では単調減少しており、正反対の傾向を示していることがわかる。つまり、評価手法の違いにより順位の入替えが起きているのである。そのため、仮定②が実証されたことになる。

次に、各評価手法によって得られた上位 10 形状を比較する。ある評価手法で評価したときにできる形状の並びが、他の評価手法で評価した場合においても同じ並びになるのか確認する。例えば、評価手法 4 の「波エネルギー吸収機構の吸収量で評価」したときの形状の並びに対して、同じような並びとなる評価手法は、発電量で評価できない場合での代替的な評価手法となり得るといえる。Fig.3.13 から Fig.3.16 に本研究で検討した各評価手法において、評価の高い上位 10 形状の評価値一覧を示す。また、Fig.3.17 から、Fig.3.56 に、各形状の周波数応答関数を示す。

Ratio of Evaluation Value は、各評価手法において、最も高い評価の形状を 1 とした比を示している形状名はこれまでと同様に評価手法ごとに区別して「波エネルギー収支で評価 (Evaluation method 1) : Body”A”」, 「応答振幅の大きさで評価 (Evaluation method 2) : Body”B”」, 「運動エネルギーで評価 (Evaluation method 3) : Body”C”」, 「波エネルギー吸収量で評価 (Evaluation method 4) : Body”D”」としている。下付きの数字は配置する機数を示しており（本章では単機であるため 1 としている）、上付きの数字は形状番号である。

・評価手法1：「波エネルギー収支で評価」したときの上位10形状 ($A_1^{(1)} \sim A_1^{(10)}$)

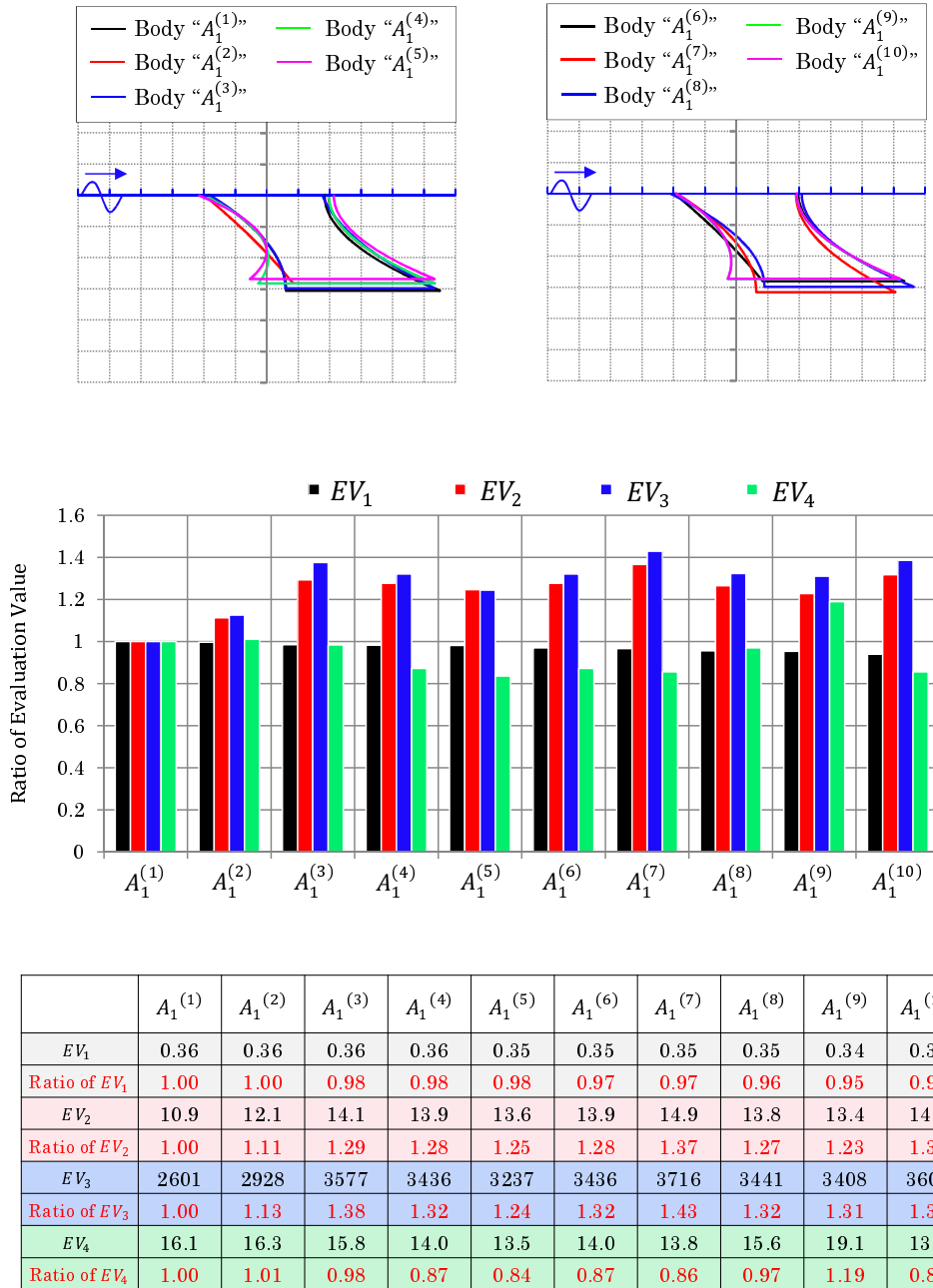


Fig. 3.13: Summary of evaluation method 1 - $A_1^{(1)} \sim A_1^{(10)}$ -.

・評価手法2：「応答振幅の大きさで評価」したときの上位10形状 ($B_1^{(1)} \sim B_1^{(10)}$)

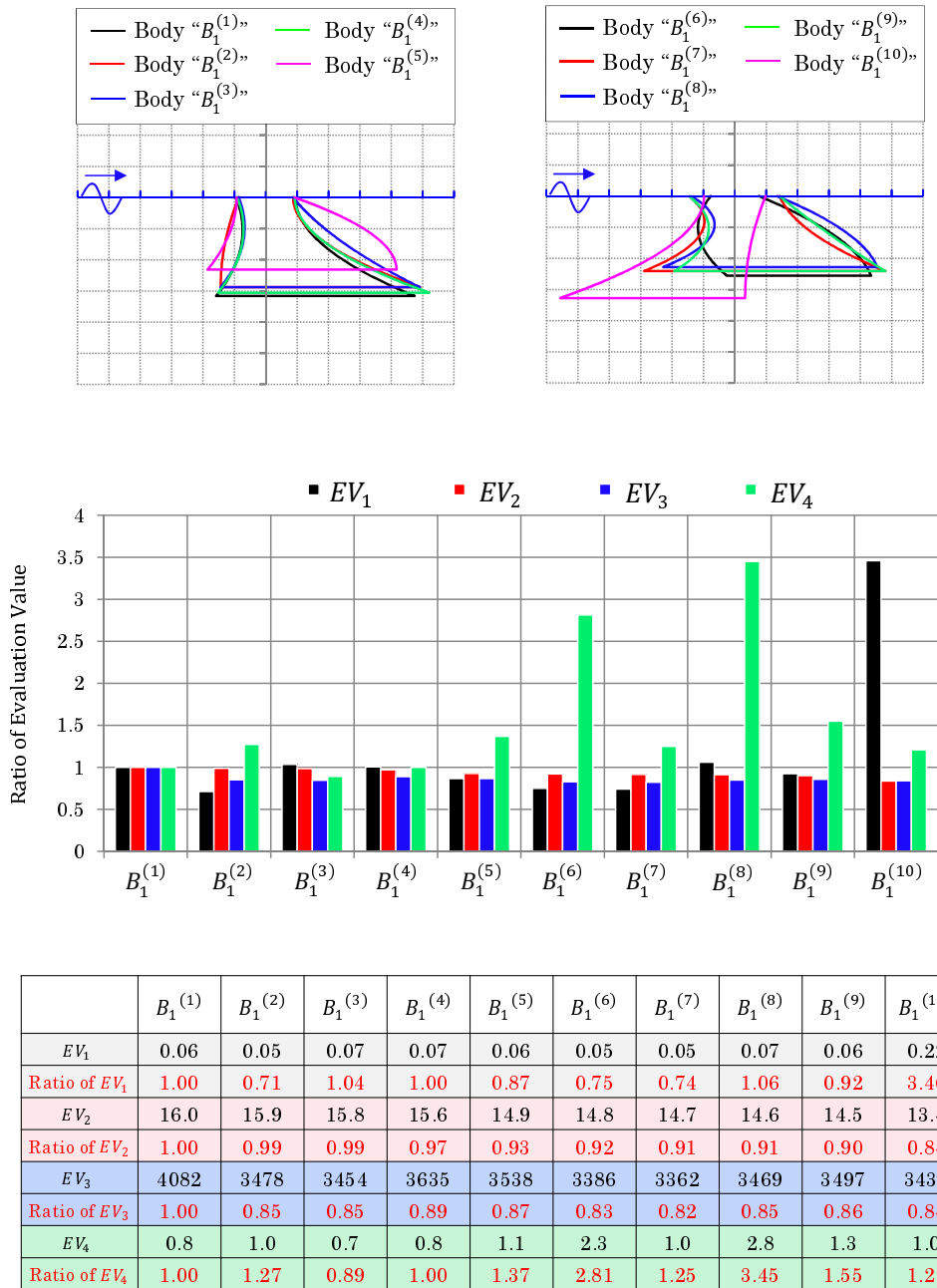


Fig. 3.14: Summary of evaluation method 2 - $B_1^{(1)} \sim B_1^{(10)}$ -.

・評価手法3：「運動エネルギーで評価」したときの上位10形状 ($C_1^{(1)} \sim C_1^{(10)}$)

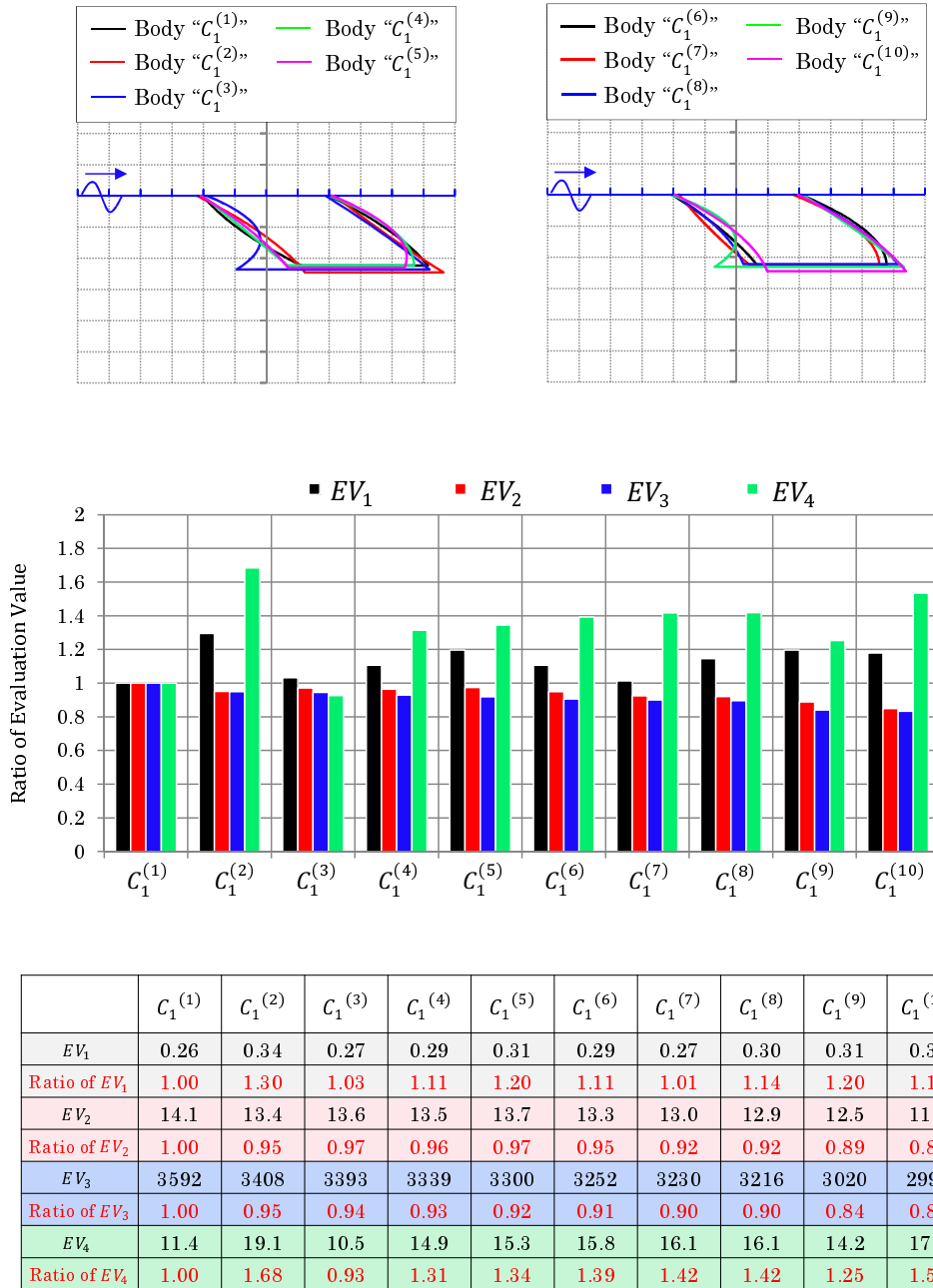


Fig. 3.15: Summary of evaluation method 3 - $C_1^{(1)} \sim C_1^{(10)}$ -.

・評価手法4:「エネルギー吸収機構の吸収量で評価」したときの上位10形状 ($D_1^{(1)} \sim D_1^{(10)}$)

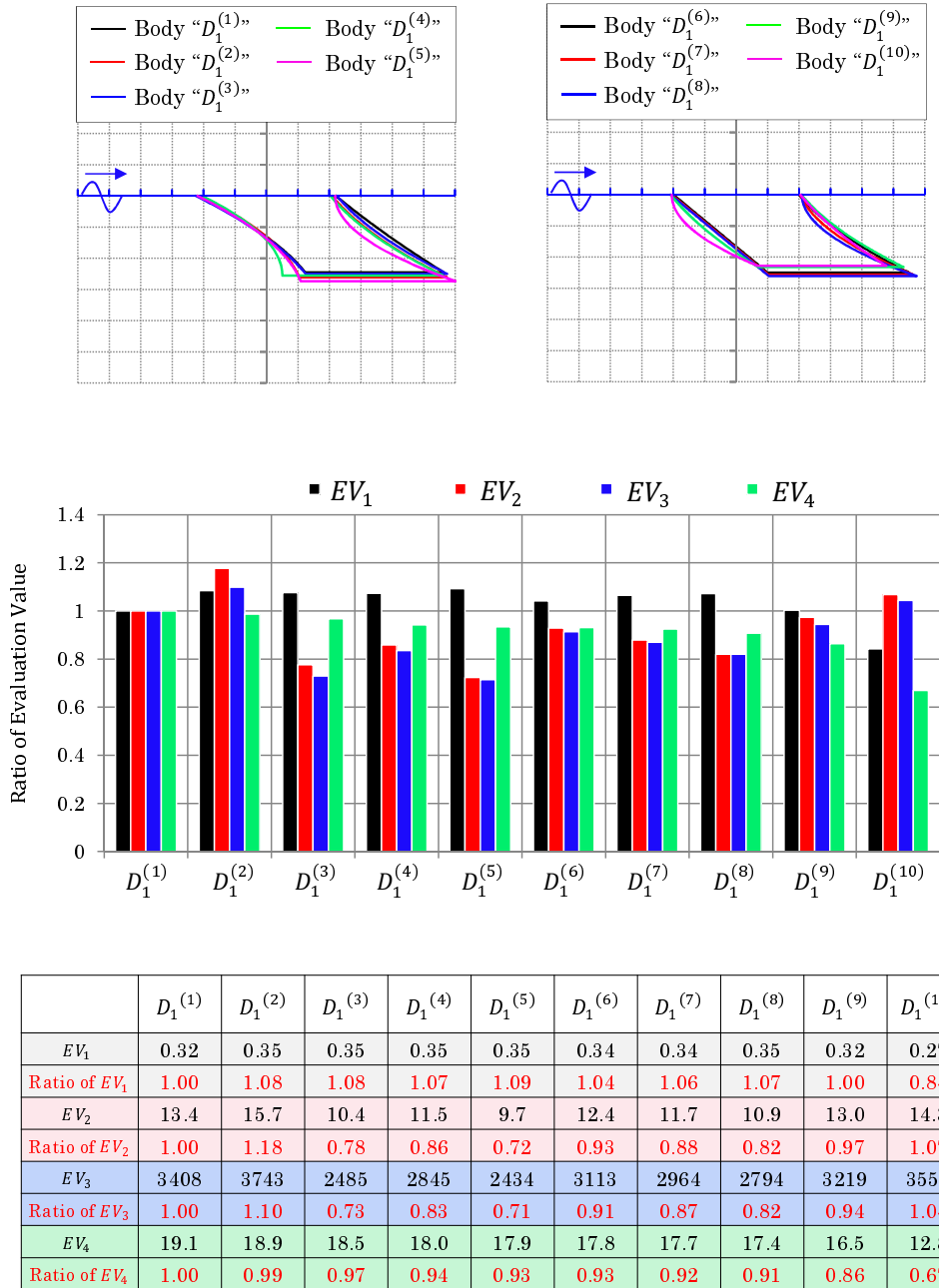
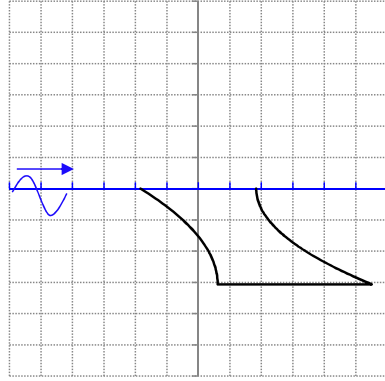


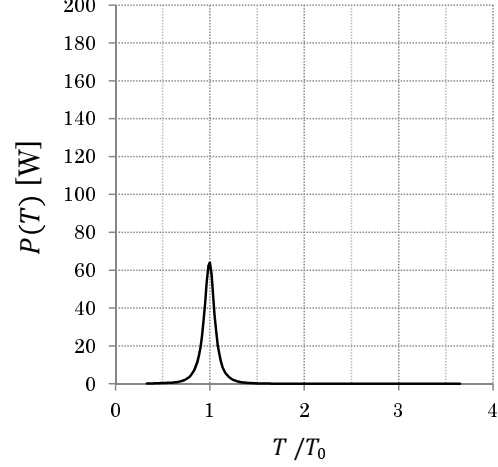
Fig. 3.16: Summary of evaluation method 4 - $D_1^{(1)} \sim D_1^{(10)}$ -.

・評価手法1:「波エネルギー収支で評価」:最も評価値の高い形状 $A_1^{(1)}$

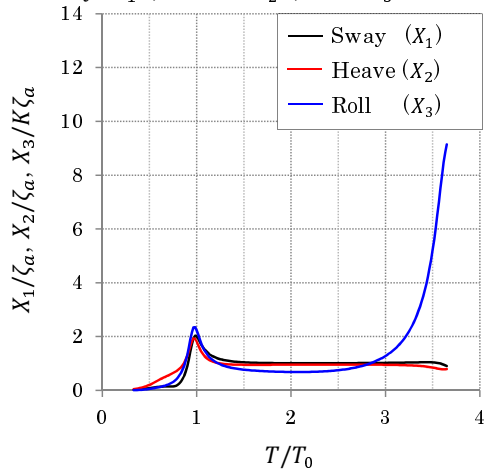
(a) Body shape



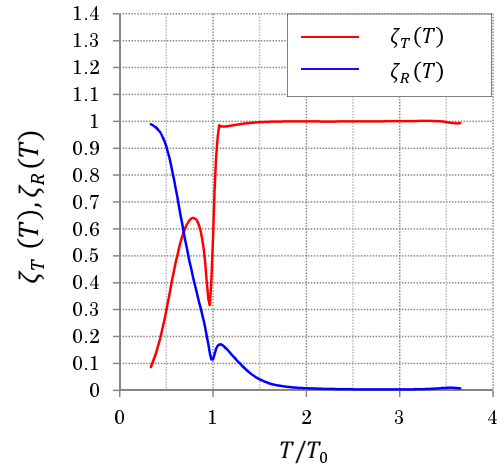
(b) Power $P(T)$



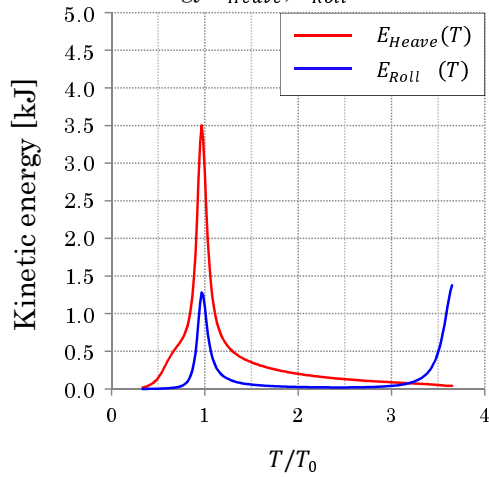
(c) Sway (X_1), Heave (X_2), Roll (X_3)



(d) Transmission and reflection wave coefficient



(e) Kinetic energy E_{Heave}, E_{Roll}



(f) Wave energy absorption efficiency $\eta(T)$

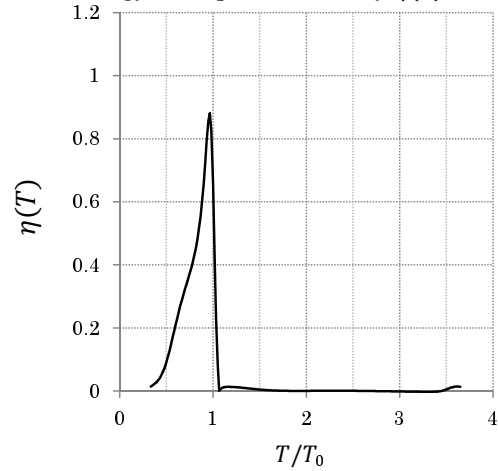
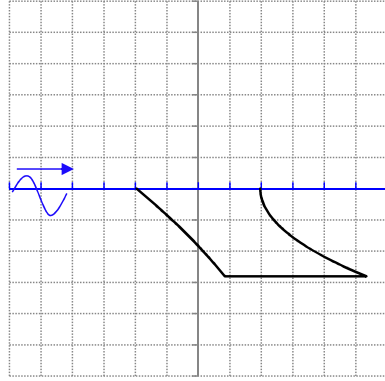


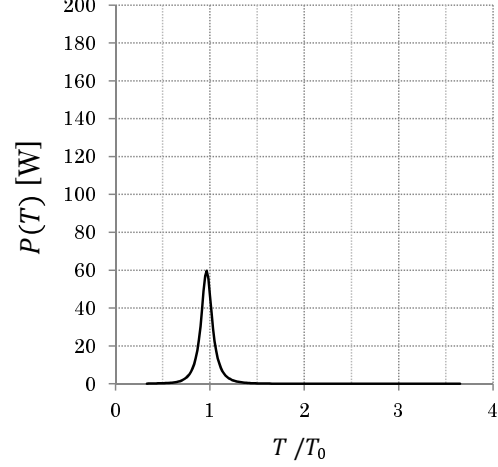
Fig. 3.17: Evaluation method1 - $A_1^{(1)}$ -.

・評価手法1:「波エネルギー収支で評価」:2番目に評価値の高い形状 $A_1^{(2)}$

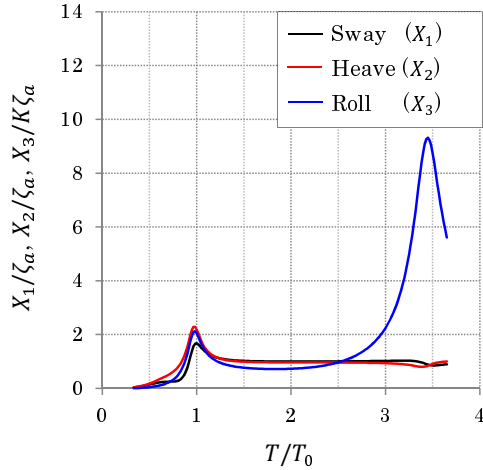
(a) Body shape



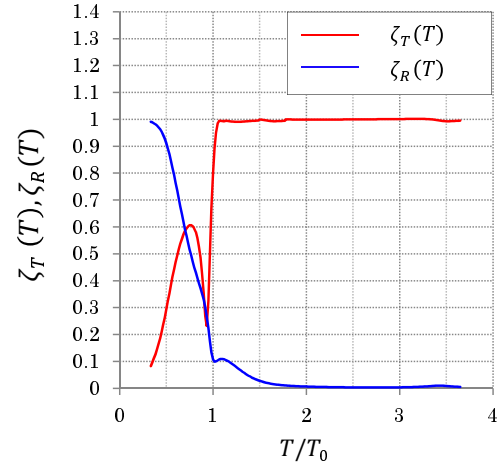
(b) Power $P(T)$



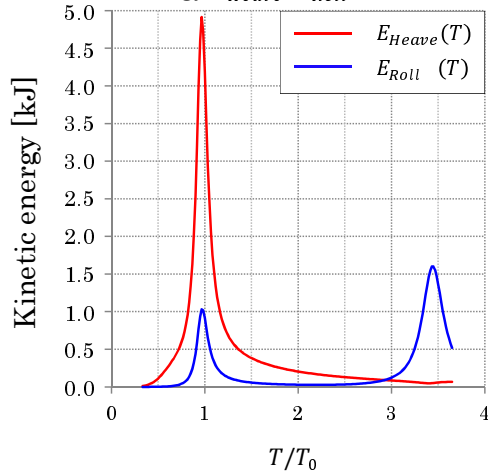
(c) Sway (X_1), Heave (X_2), Roll (X_3)



(d) Transmission and reflection wave coefficient



(e) Kinetic energy E_{Heave}, E_{Roll}



(f) Wave energy absorption efficiency $\eta(T)$

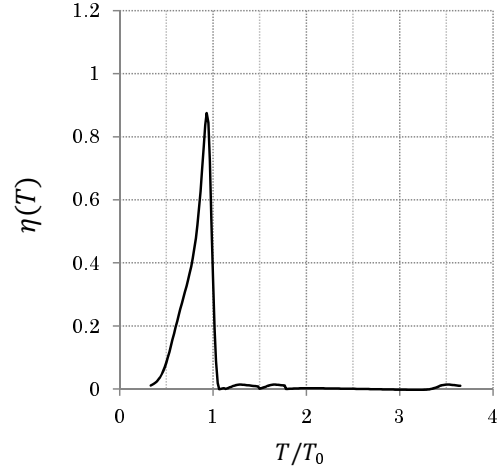
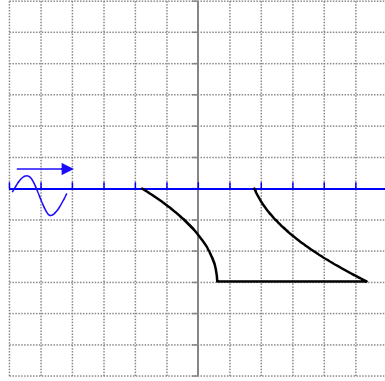


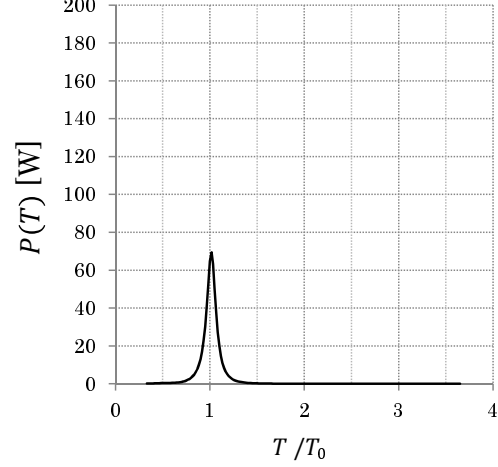
Fig. 3.18: Evaluation method1 - $A_1^{(2)}$ -.

・評価手法1:「波エネルギー収支で評価」:3番目に評価値の高い形状 $A_1^{(3)}$

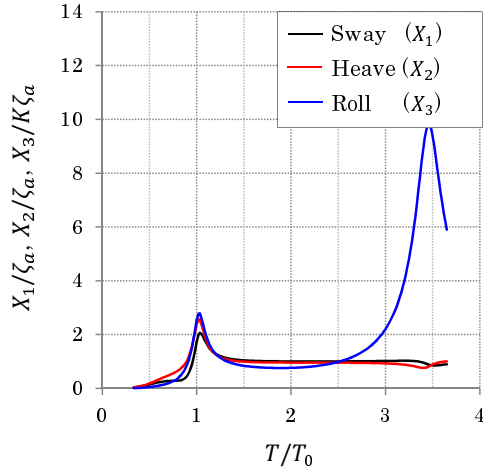
(a) Body shape



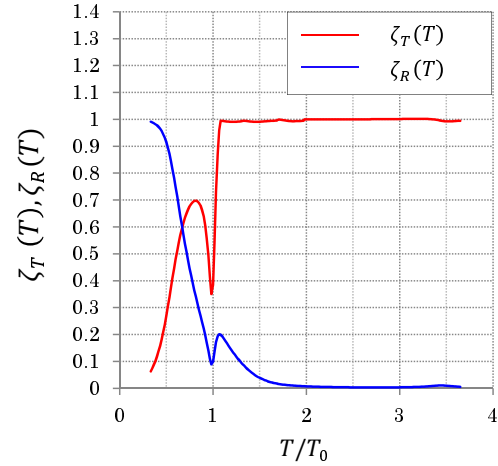
(b) Power $P(T)$



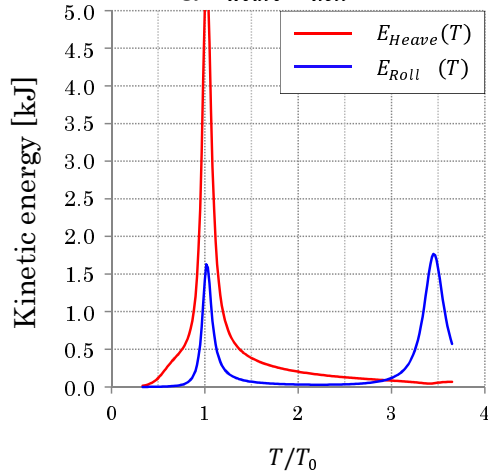
(c) Sway (X_1), Heave (X_2), Roll (X_3)



(d) Transmission and reflection wave coefficient



(e) Kinetic energy E_{Heave}, E_{Roll}



(f) Wave energy absorption efficiency $\eta(T)$

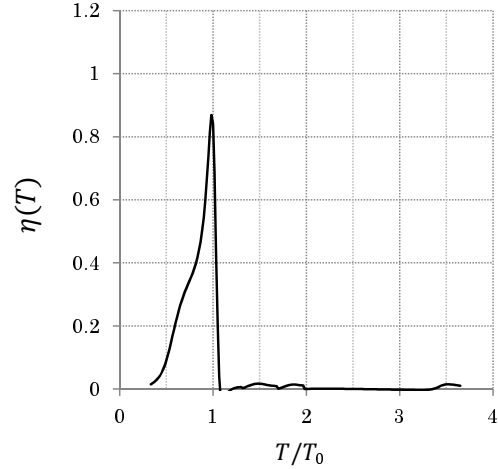
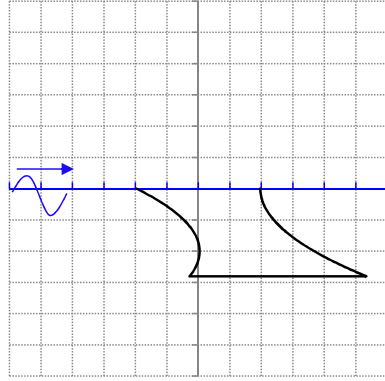


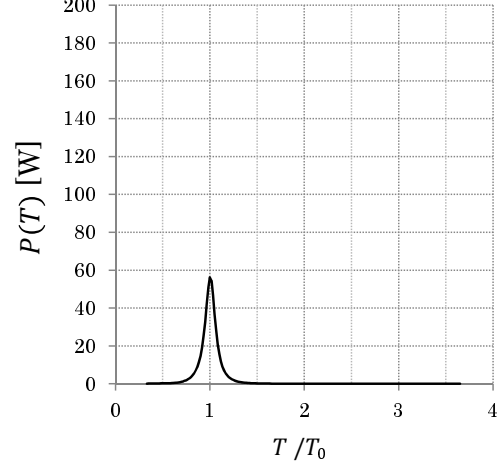
Fig. 3.19: Evaluation method1 - $A_1^{(3)}$ -.

・評価手法1:「波エネルギー収支で評価」:4番目に評価値の高い形状 $A_1^{(4)}$

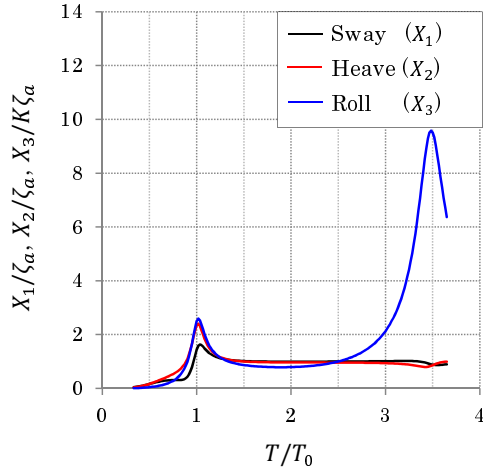
(a) Body shape



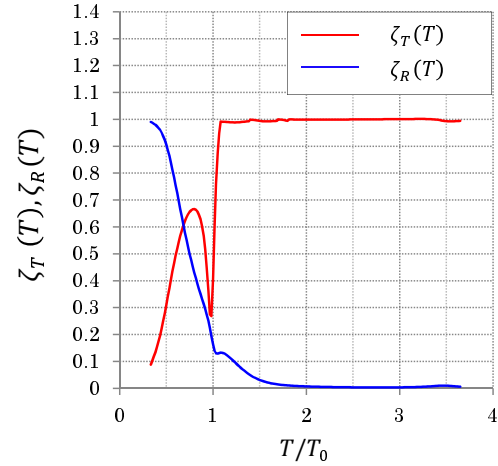
(b) Power $P(T)$



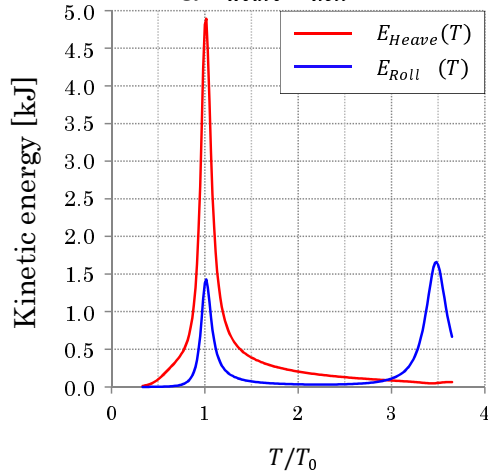
(c) Sway (X_1), Heave (X_2), Roll (X_3)



(d) Transmission and reflection wave coefficient



(e) Kinetic energy E_{Heave}, E_{Roll}



(f) Wave energy absorption efficiency $\eta(T)$

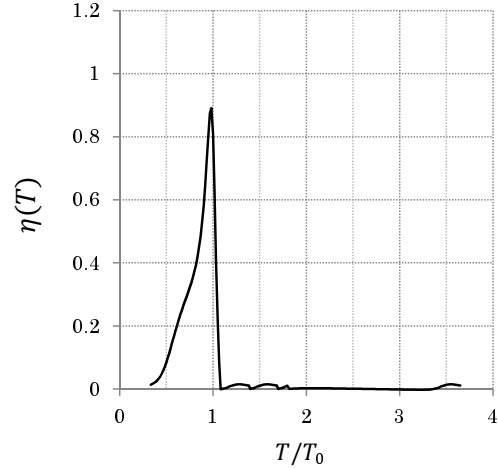
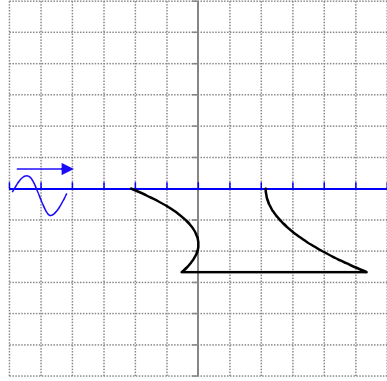


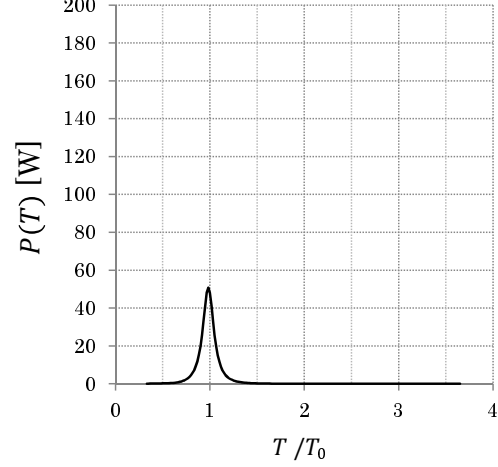
Fig. 3.20: Evaluation method1 - $A_1^{(4)}$ -.

・評価手法1:「波エネルギー収支で評価」:5番目に評価値の高い形状 $A_1^{(5)}$

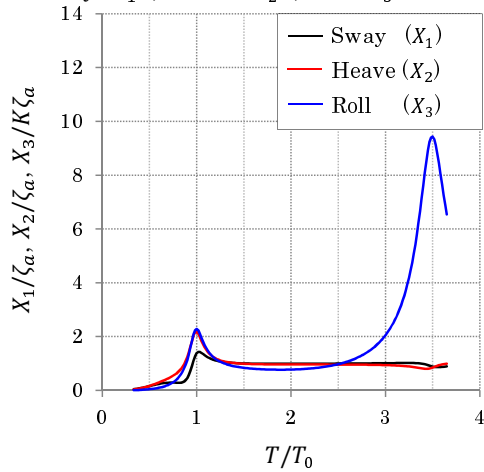
(a) Body shape



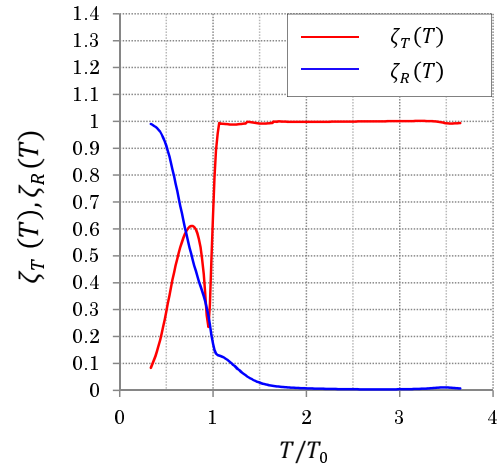
(b) Power $P(T)$



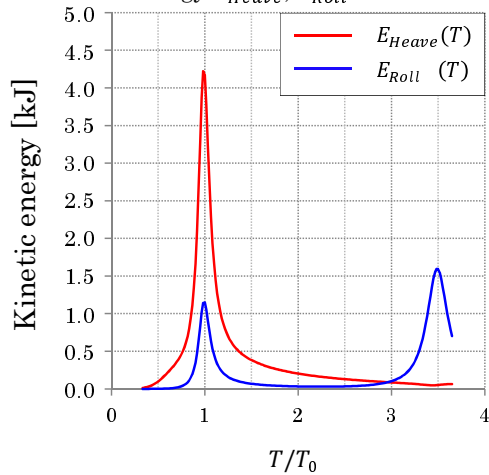
(c) Sway (X_1), Heave (X_2), Roll (X_3)



(d) Transmission and reflection wave coefficient



(e) Kinetic energy E_{Heave}, E_{Roll}



(f) Wave energy absorption efficiency $\eta(T)$

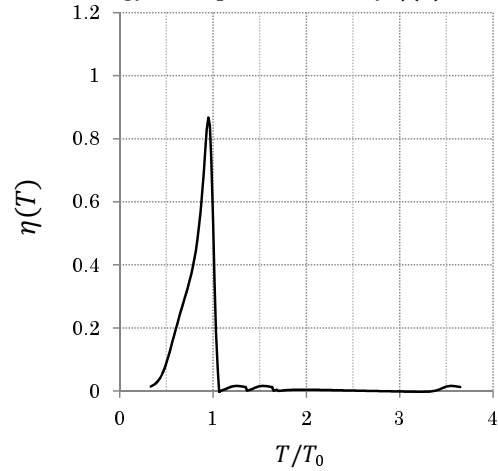
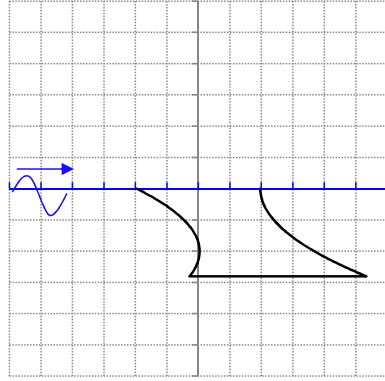


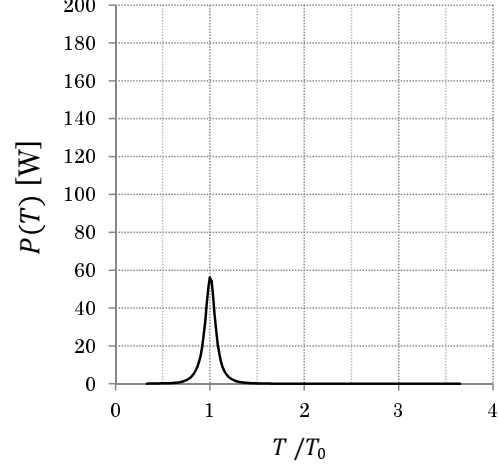
Fig. 3.21: Evaluation method1 - $A_1^{(5)}$ -.

・評価手法1:「波エネルギー収支で評価」:6番目に評価値の高い形状 $A_1^{(6)}$

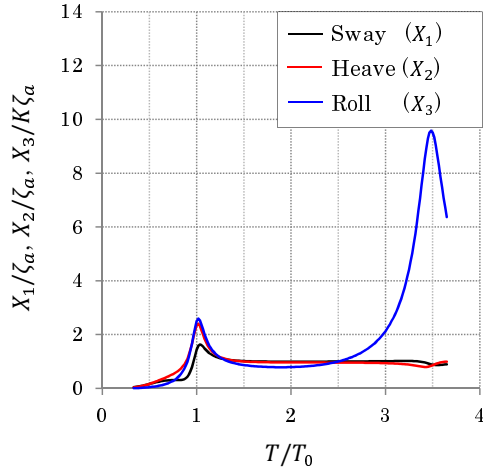
(a) Body shape



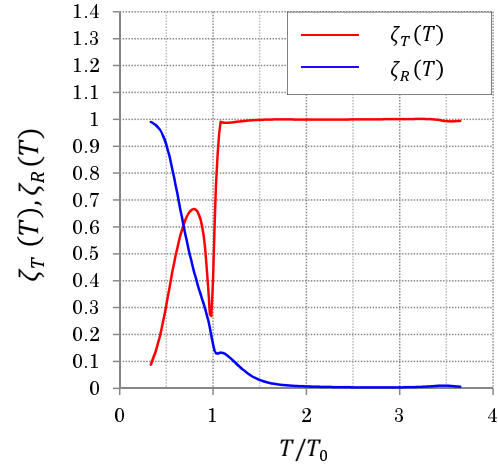
(b) Power $P(T)$



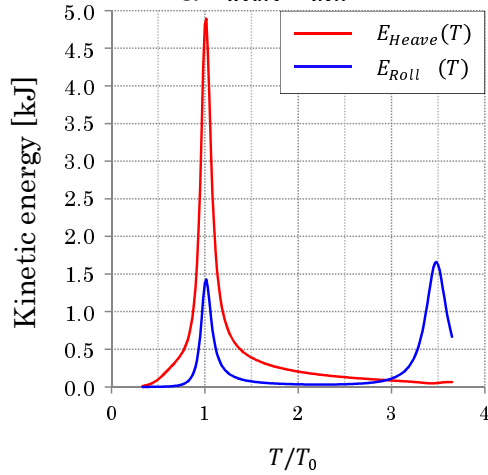
(c) Sway (X_1), Heave (X_2), Roll (X_3)



(d) Transmission and reflection wave coefficient



(e) Kinetic energy E_{Heave}, E_{Roll}



(f) Wave energy absorption efficiency $\eta(T)$

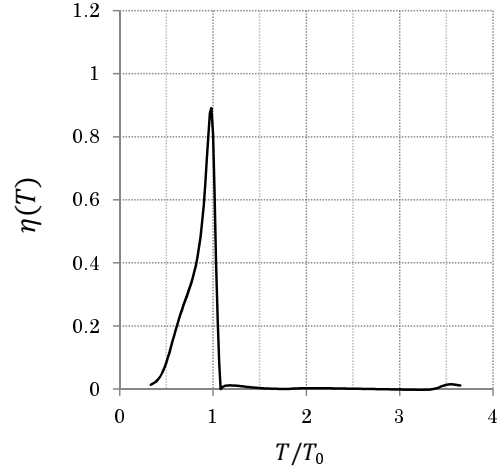
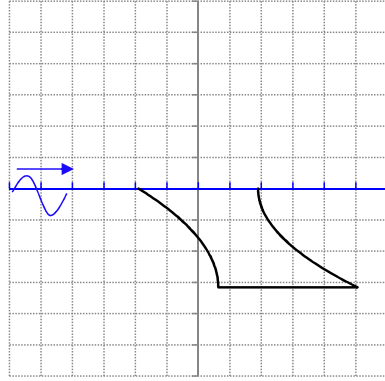


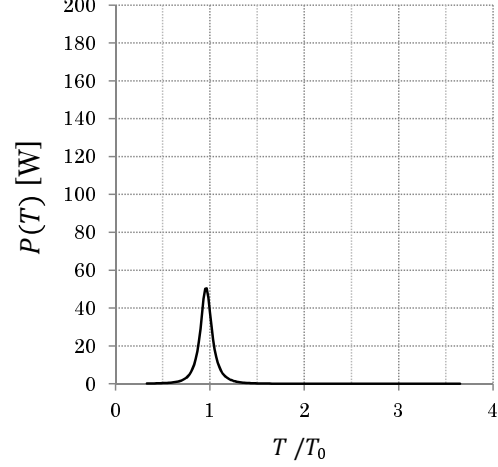
Fig. 3.22: Evaluation method1 - $A_1^{(6)}$ -.

・評価手法1:「波エネルギー収支で評価」:7番目に評価値の高い形状 $A_1^{(7)}$

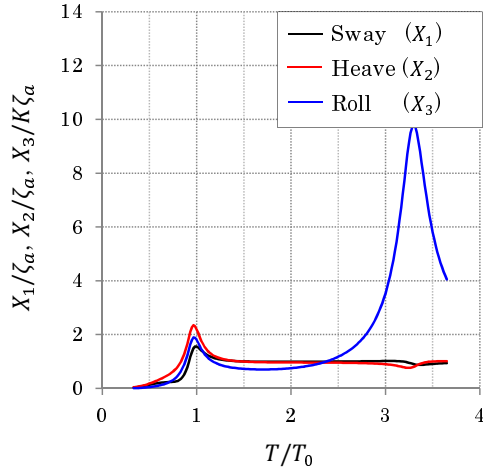
(a) Body shape



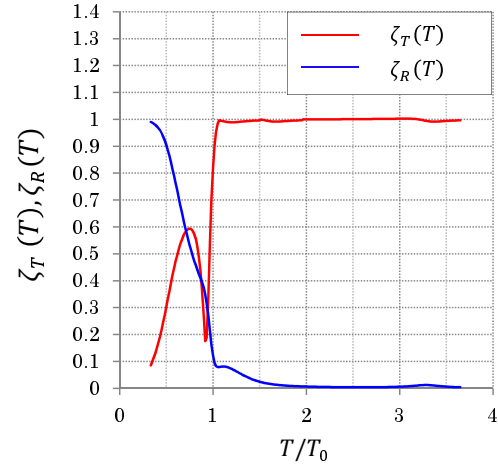
(b) Power $P(T)$



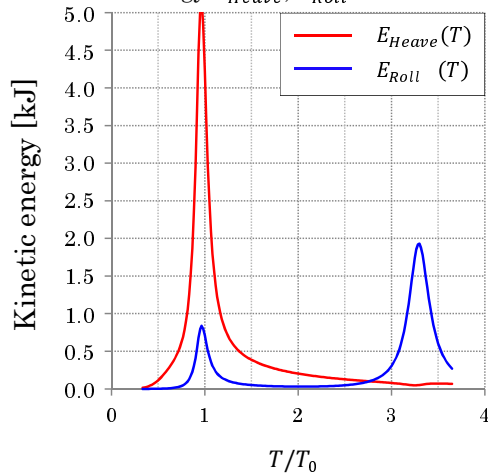
(c) Sway (X_1), Heave (X_2), Roll (X_3)



(d) Transmission and reflection wave coefficient



(e) Kinetic energy E_{Heave}, E_{Roll}



(f) Wave energy absorption efficiency $\eta(T)$

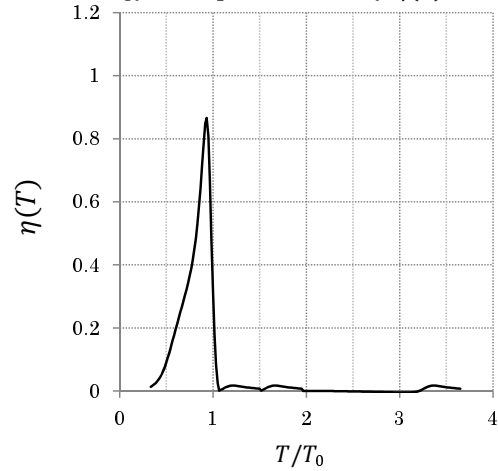
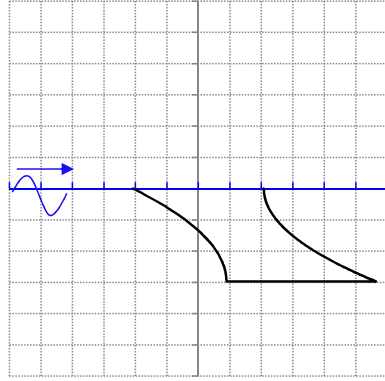


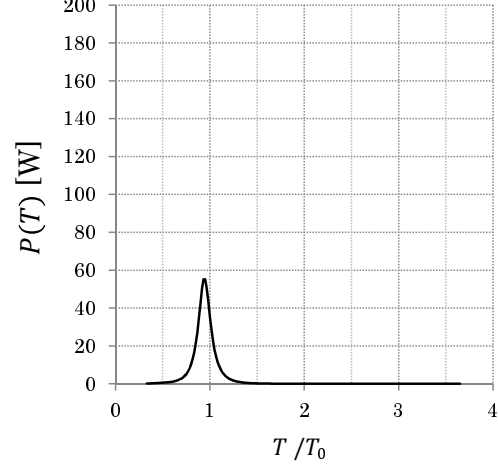
Fig. 3.23: Evaluation method1 - $A_1^{(7)}$ -.

・評価手法1:「波エネルギー収支で評価」:8番目に評価値の高い形状 $A_1^{(8)}$

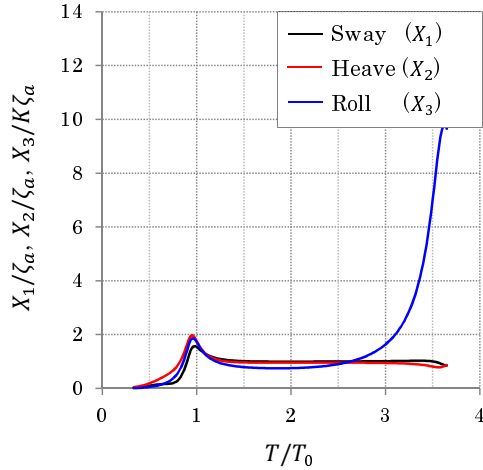
(a) Body shape



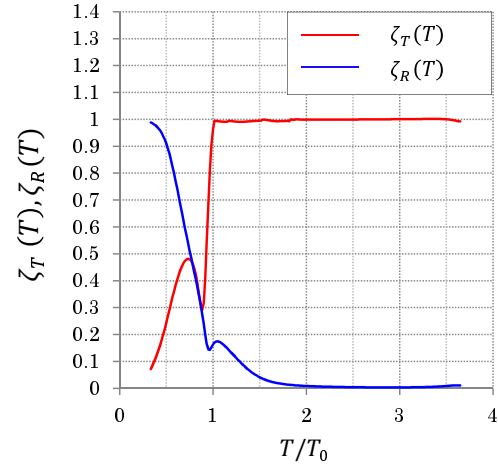
(b) Power $P(T)$



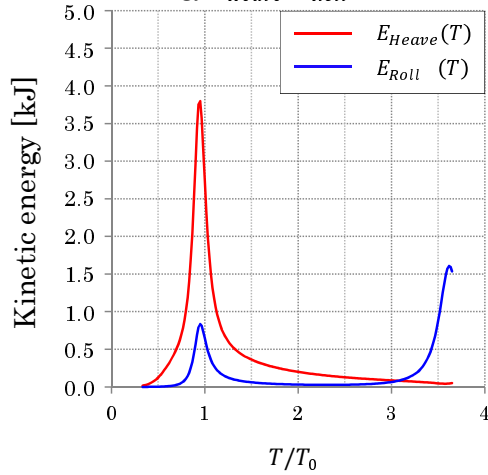
(c) Sway (X_1), Heave (X_2), Roll (X_3)



(d) Transmission and reflection wave coefficient



(e) Kinetic energy E_{Heave}, E_{Roll}



(f) Wave energy absorption efficiency $\eta(T)$

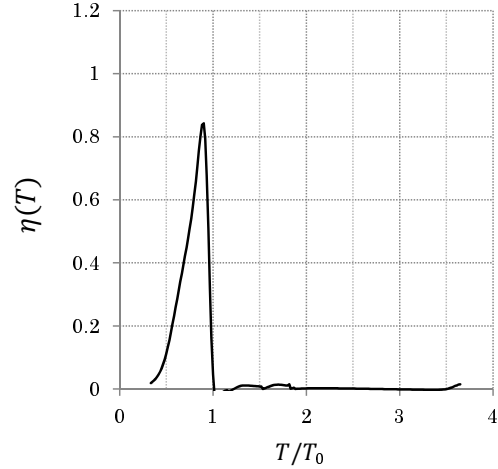
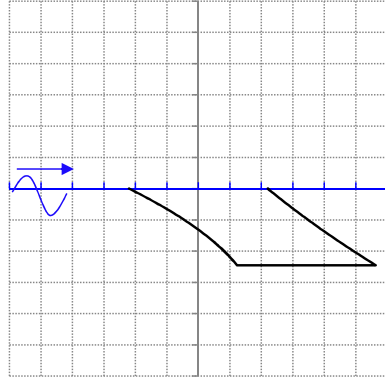


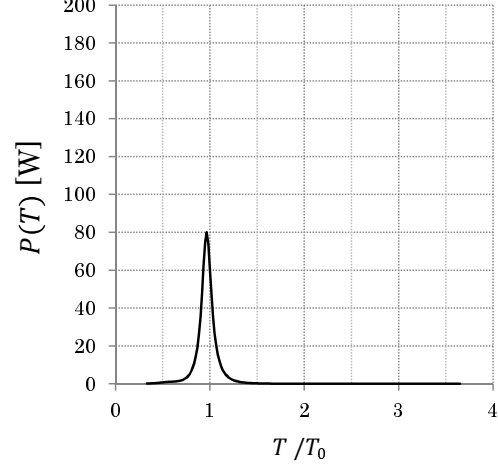
Fig. 3.24: Evaluation method1 - $A_1^{(8)}$ -.

・評価手法1:「波エネルギー収支で評価」:9番目に評価値の高い形状 $A_1^{(9)}$

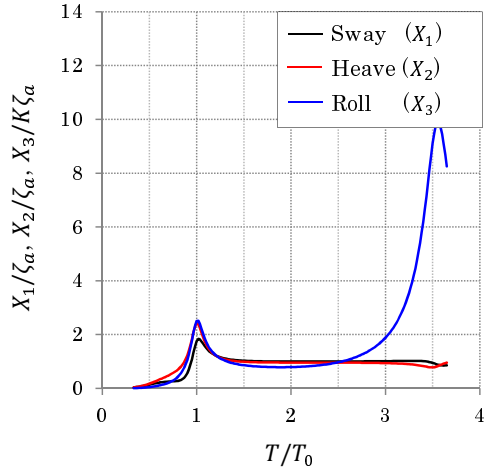
(a) Body shape



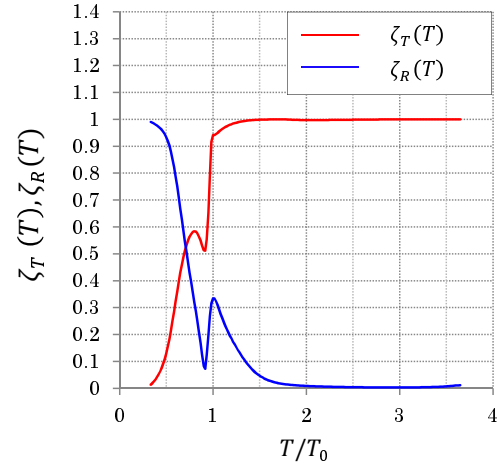
(b) Power $P(T)$



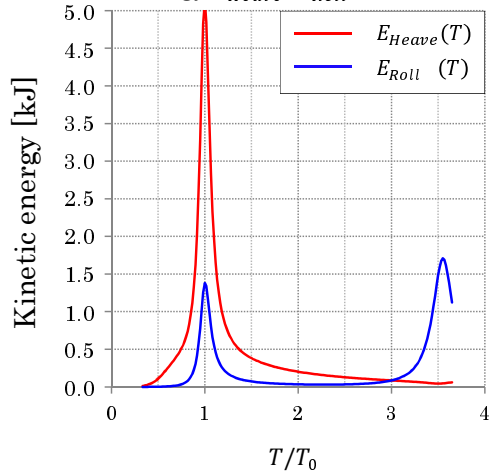
(c) Sway (X_1), Heave (X_2), Roll (X_3)



(d) Transmission and reflection wave coefficient



(e) Kinetic energy E_{Heave}, E_{Roll}



(f) Wave energy absorption efficiency $\eta(T)$

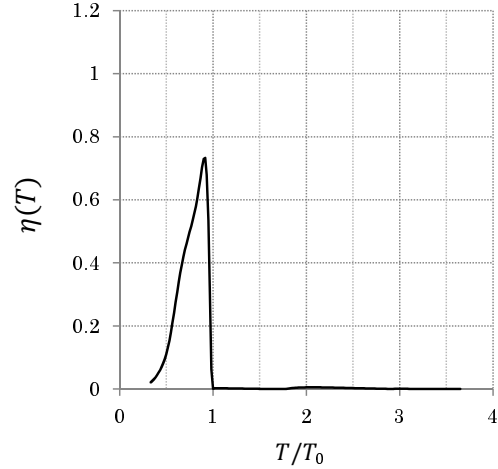
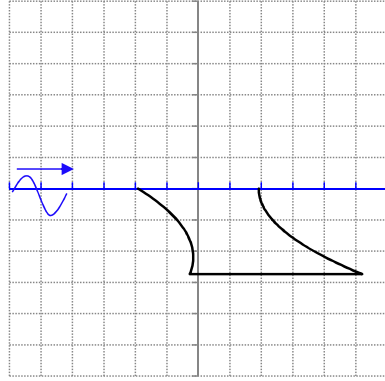


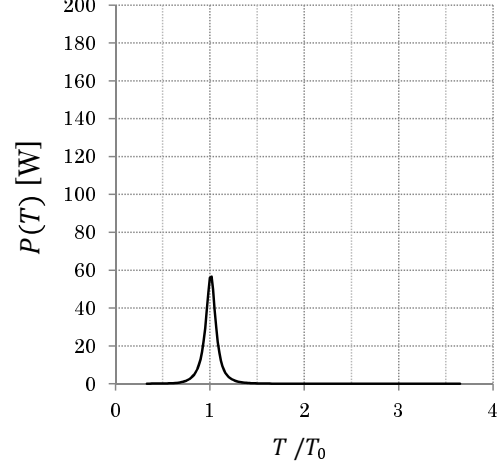
Fig. 3.25: Evaluation method1 - $A_1^{(9)}$ -.

・評価手法1:「波エネルギー収支で評価」:10番目に評価値の高い形状 $A_1^{(10)}$

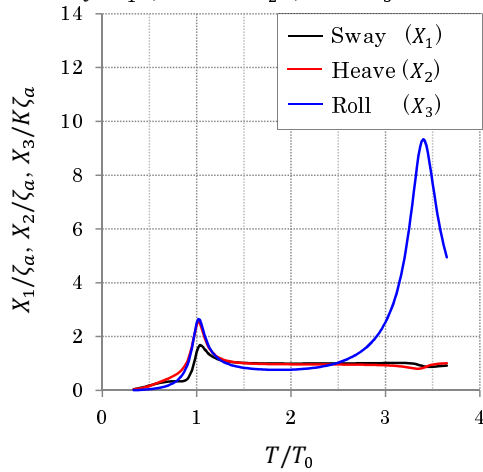
(a) Body shape



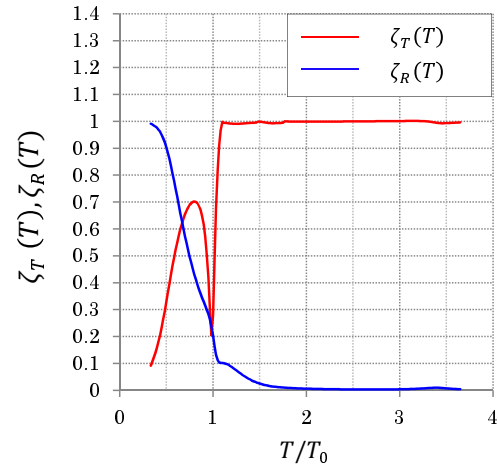
(b) Power $P(T)$



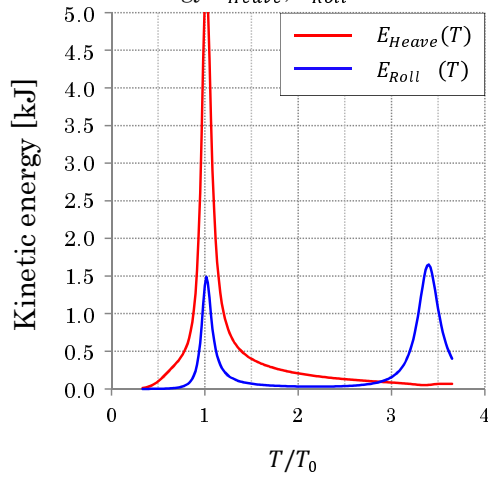
(c) Sway (X_1), Heave (X_2), Roll (X_3)



(d) Transmission and reflection wave coefficient



(e) Kinetic energy E_{Heave}, E_{Roll}



(f) Wave energy absorption efficiency $\eta(T)$

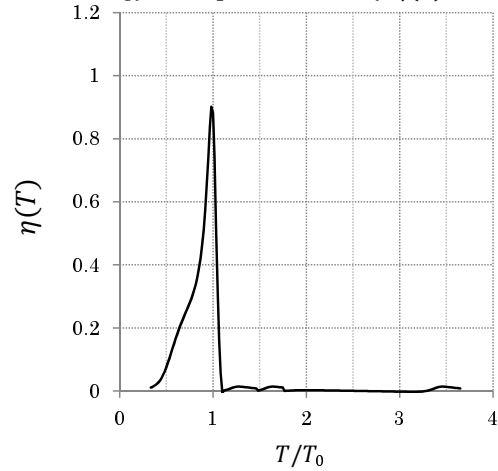
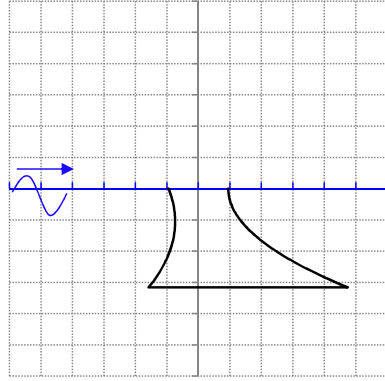


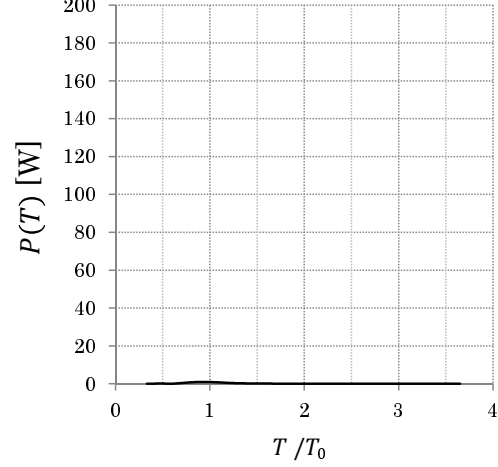
Fig. 3.26: Evaluation method1 - $A_1^{(10)}$ -.

・評価手法2：「応答振幅の大きさを評価」：最も評価値の高い形状 $B_1^{(1)}$

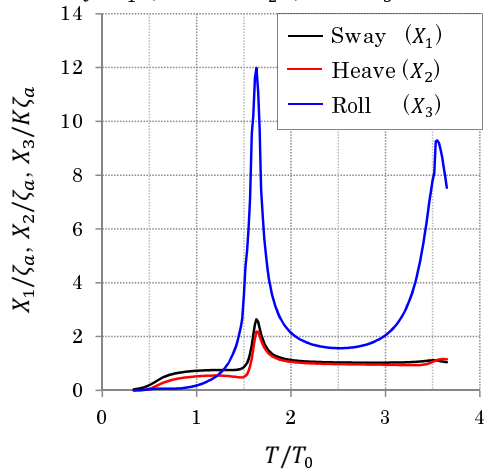
(a) Body shape



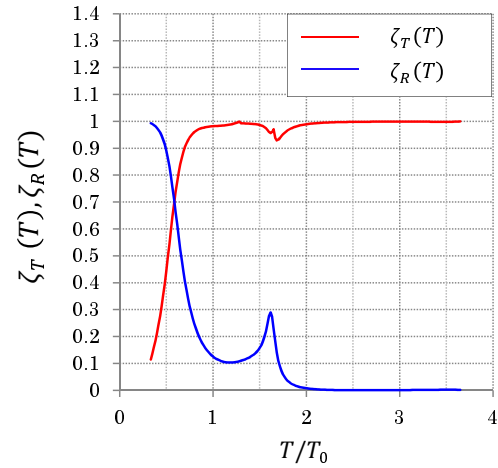
(b) Power $P(T)$



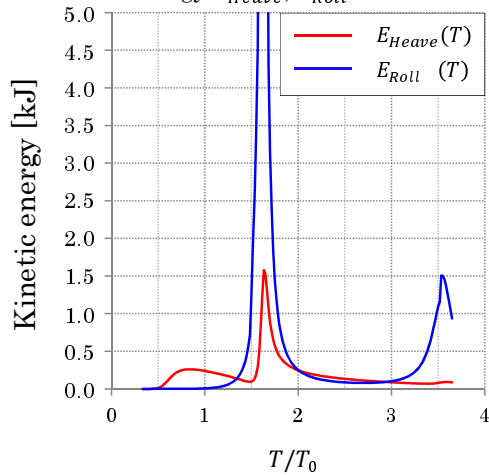
(c) Sway (X_1), Heave (X_2), Roll (X_3)



(d) Transmission and reflection wave coefficient



(e) Kinetic energy E_{Heave}, E_{Roll}



(f) Wave energy absorption efficiency $\eta(T)$

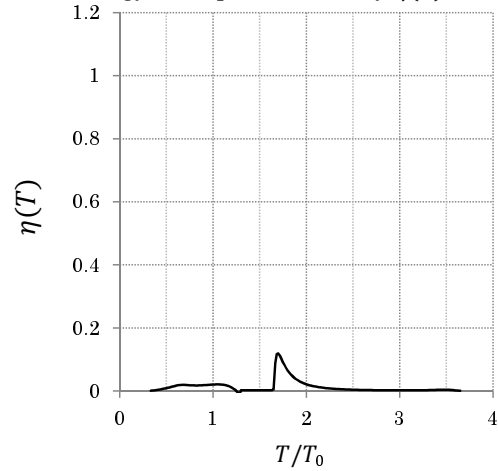


Fig. 3.27: Evaluation method2 - $B_1^{(1)}$ -.

・評価手法2：「応答振幅の大きさを評価」：2番目に評価値の高い形状 $B_1^{(2)}$

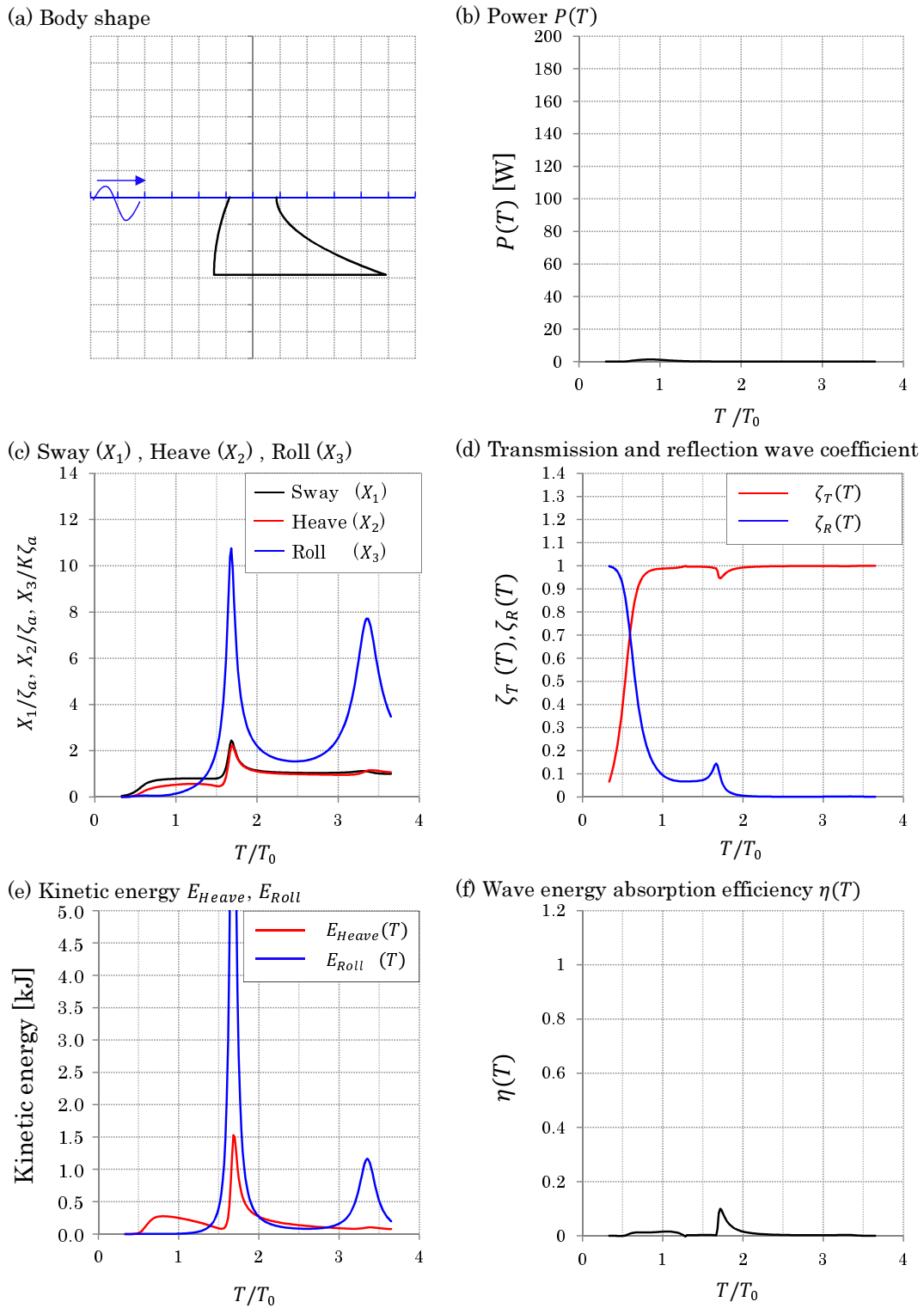
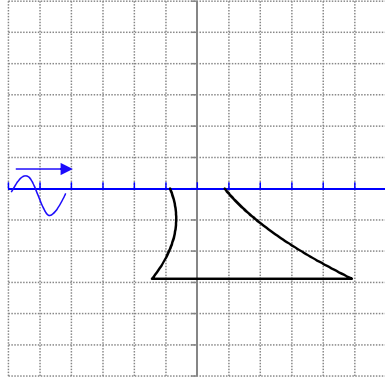


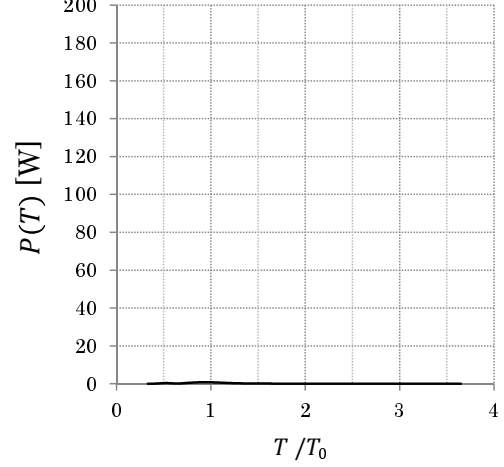
Fig. 3.28: Evaluation method2 - $B_1^{(2)}$ -.

・評価手法2：「応答振幅の大きさを評価」：3番目に評価値の高い形状 $B_1^{(3)}$

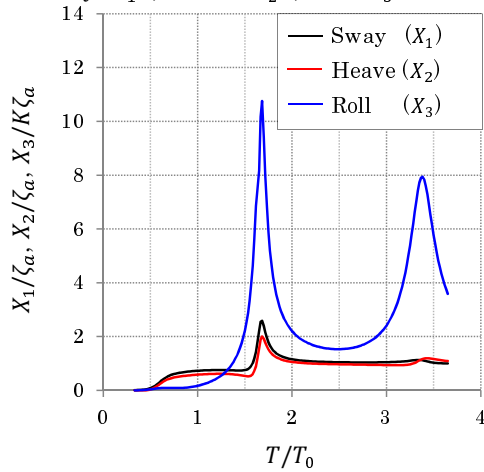
(a) Body shape



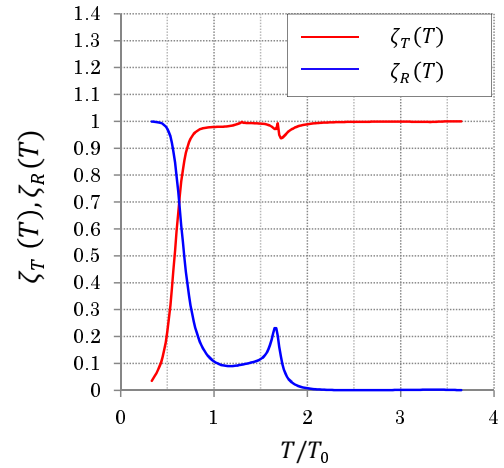
(b) Power $P(T)$



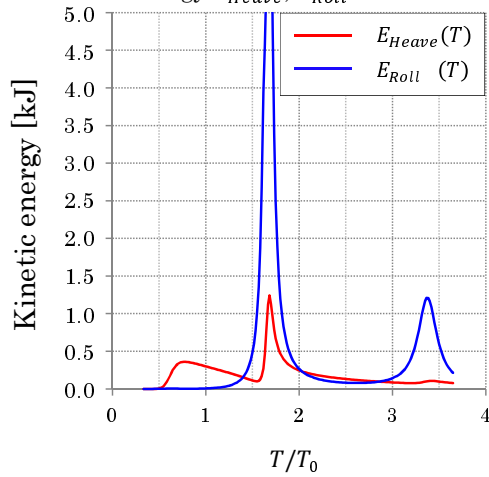
(c) Sway (X_1), Heave (X_2), Roll (X_3)



(d) Transmission and reflection wave coefficient



(e) Kinetic energy E_{Heave}, E_{Roll}



(f) Wave energy absorption efficiency $\eta(T)$

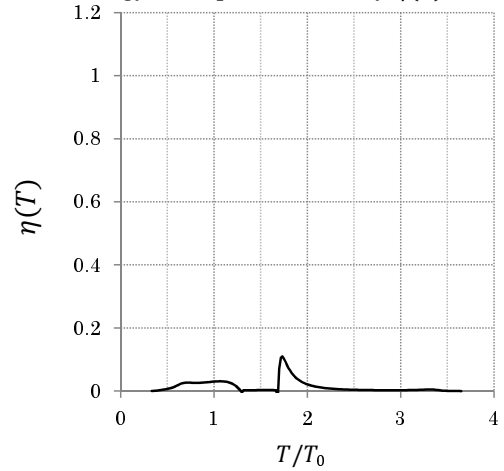
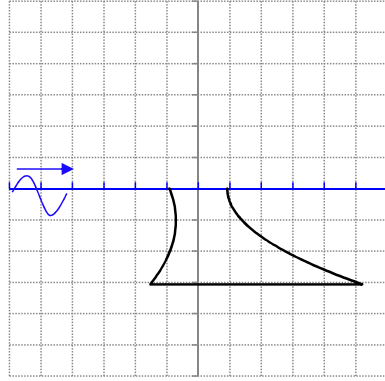


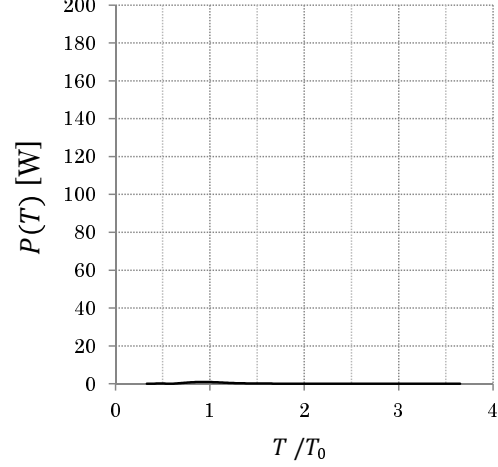
Fig. 3.29: Evaluation method2 - $B_1^{(3)}$ -.

・評価手法2：「応答振幅の大きさを評価」：4番目に評価値の高い形状 $B_1^{(4)}$

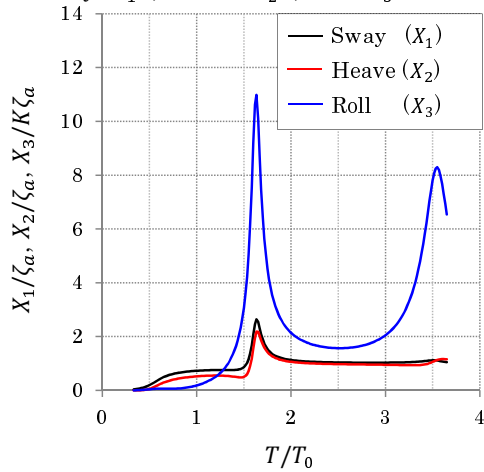
(a) Body shape



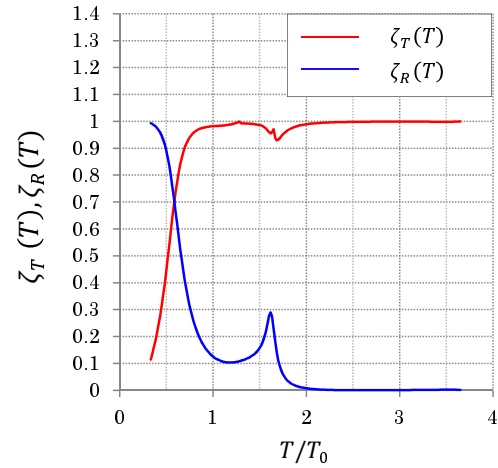
(b) Power $P(T)$



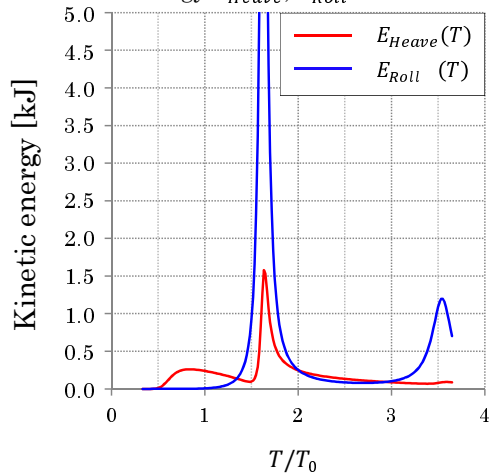
(c) Sway (X_1), Heave (X_2), Roll (X_3)



(d) Transmission and reflection wave coefficient



(e) Kinetic energy E_{Heave}, E_{Roll}



(f) Wave energy absorption efficiency $\eta(T)$

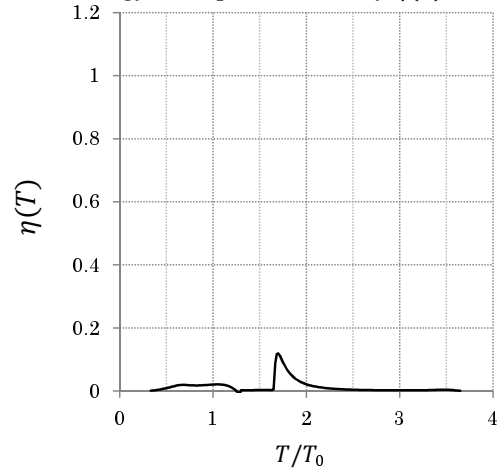


Fig. 3.30: Evaluation method2 - $B_1^{(4)}$ -.

・評価手法2:「応答振幅の大きさを評価」:5番目に評価値の高い形状 $B_1^{(5)}$

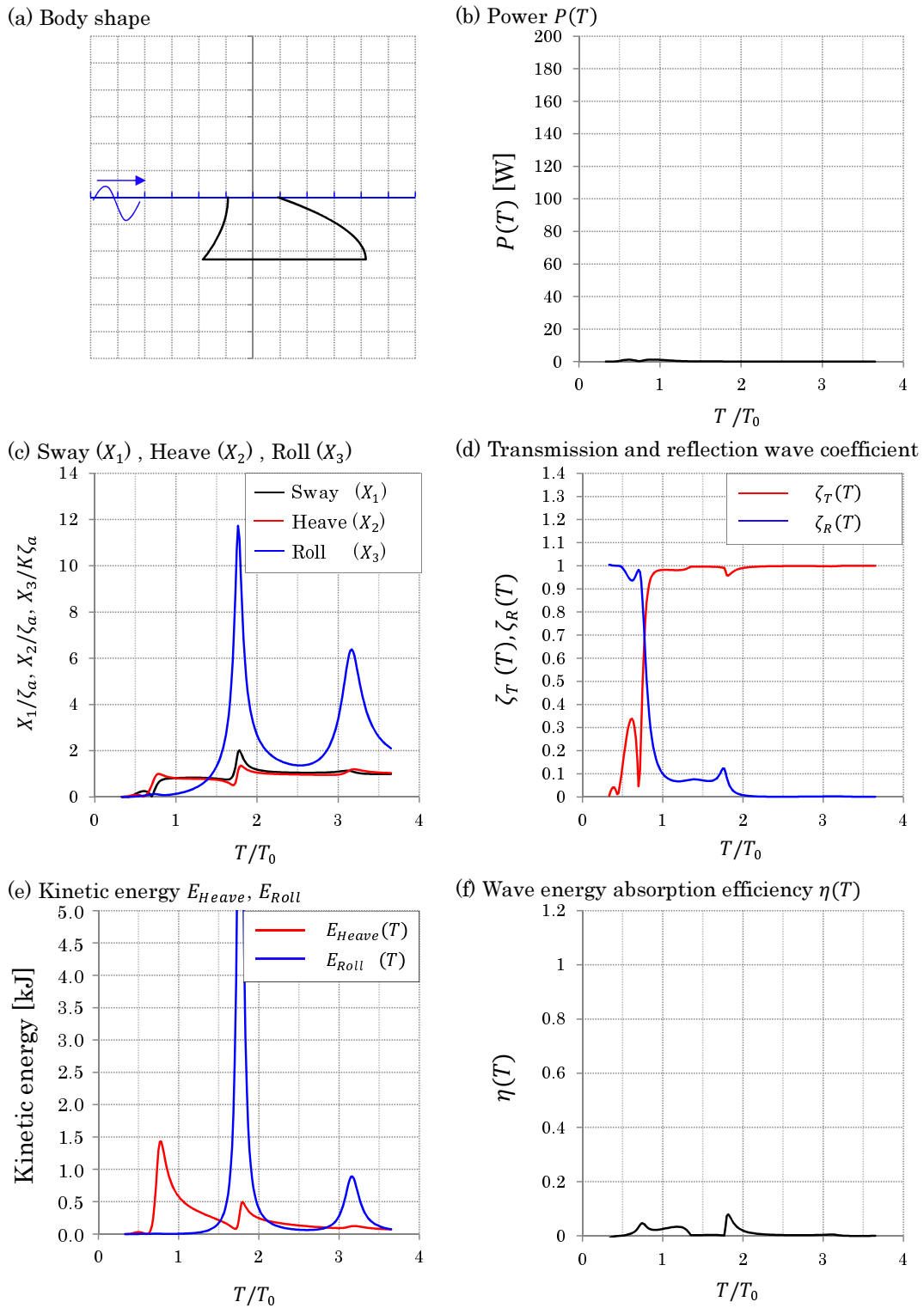


Fig. 3.31: Evaluation method2 - $B_1^{(5)}$ -.

・評価手法2：「応答振幅の大きさを評価」：6番目に評価値の高い形状 $B_1^{(6)}$

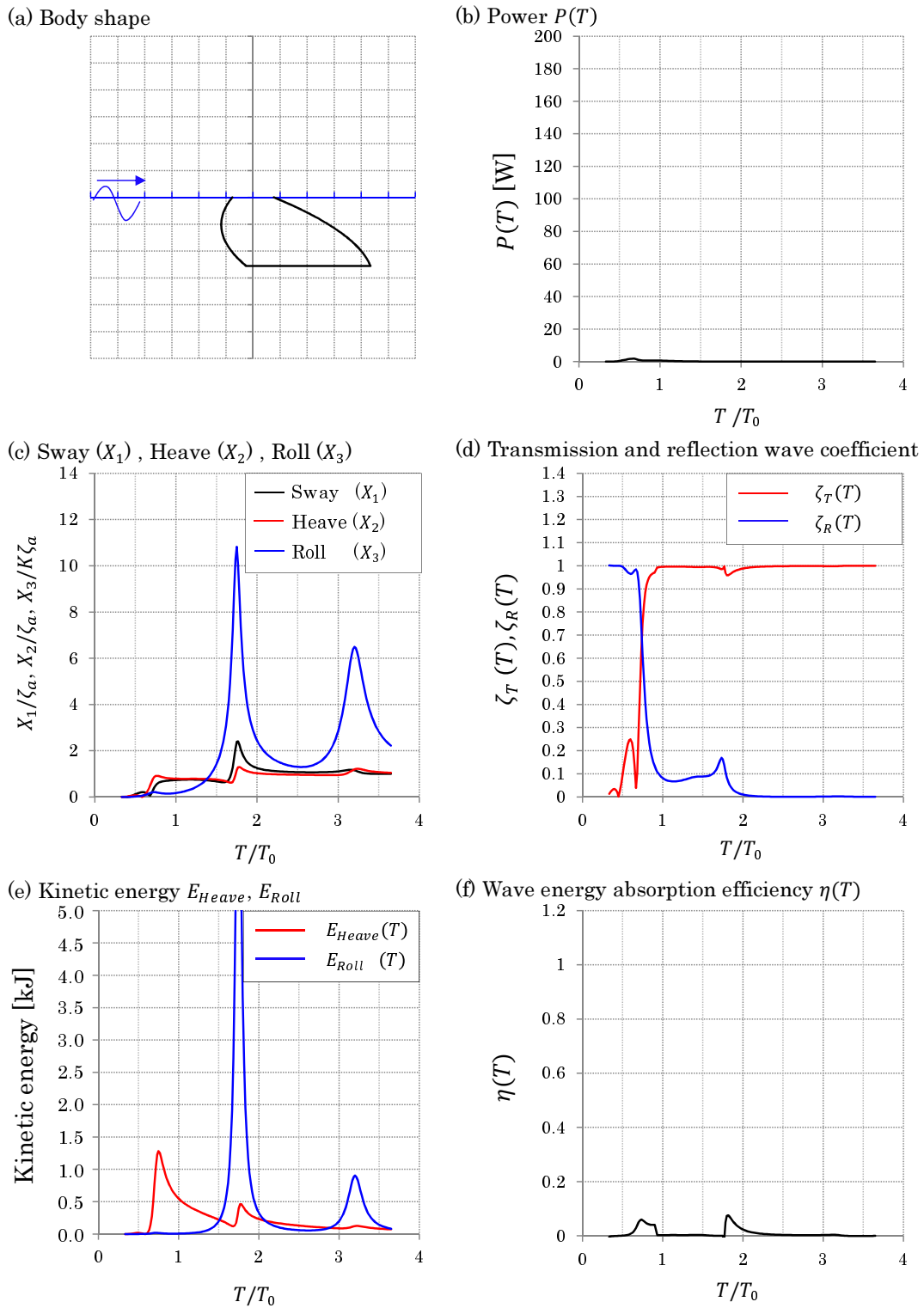


Fig. 3.32: Evaluation method2 - $B_1^{(6)}$ -.

・評価手法2:「応答振幅の大きさで評価」:7番目に評価値の高い形状 $B_1^{(7)}$

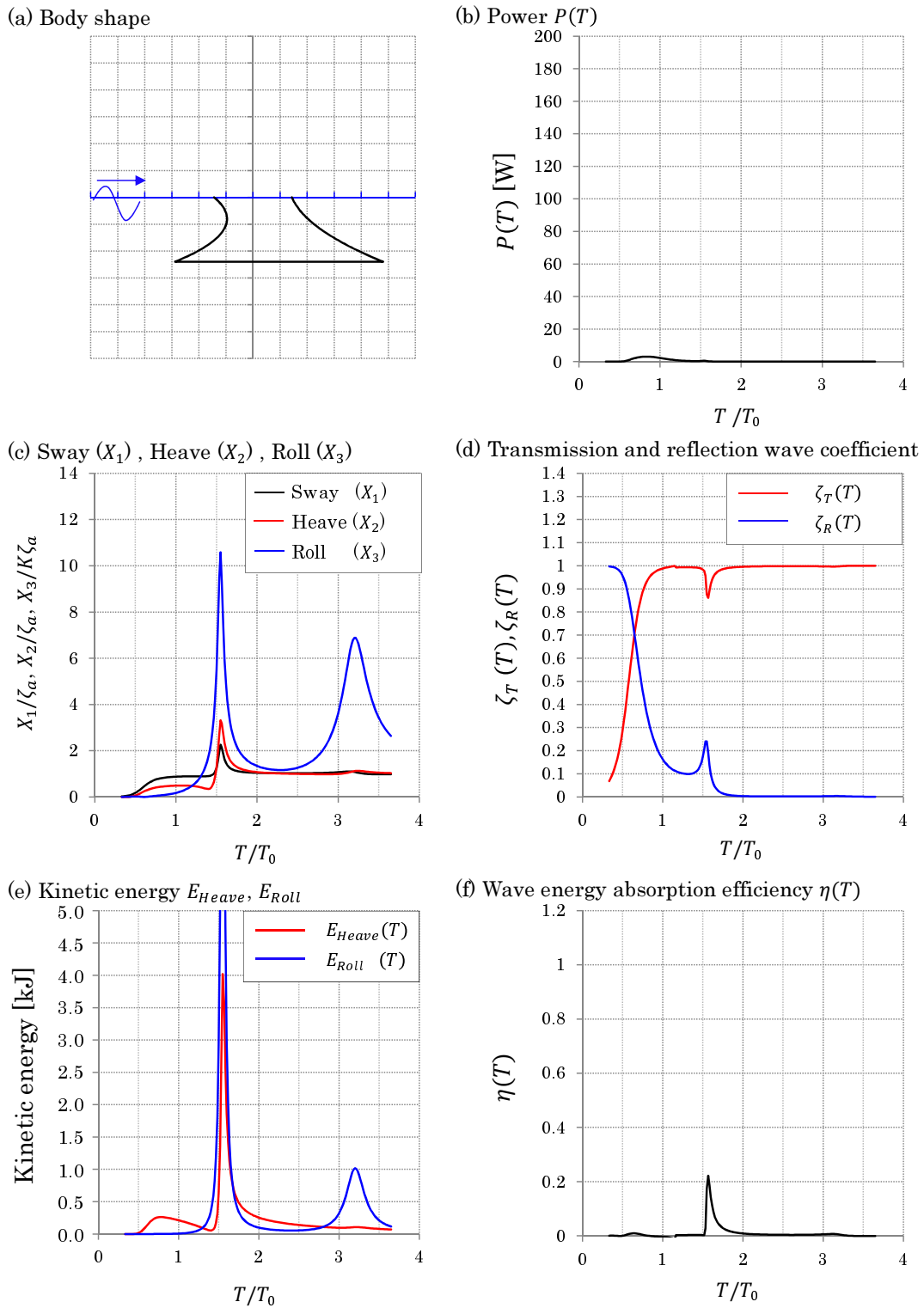


Fig. 3.33: Evaluation method 2 - $B_1^{(7)}$ -.

・評価手法2：「応答振幅の大きさを評価」：8番目に評価値の高い形状 $B_1^{(8)}$

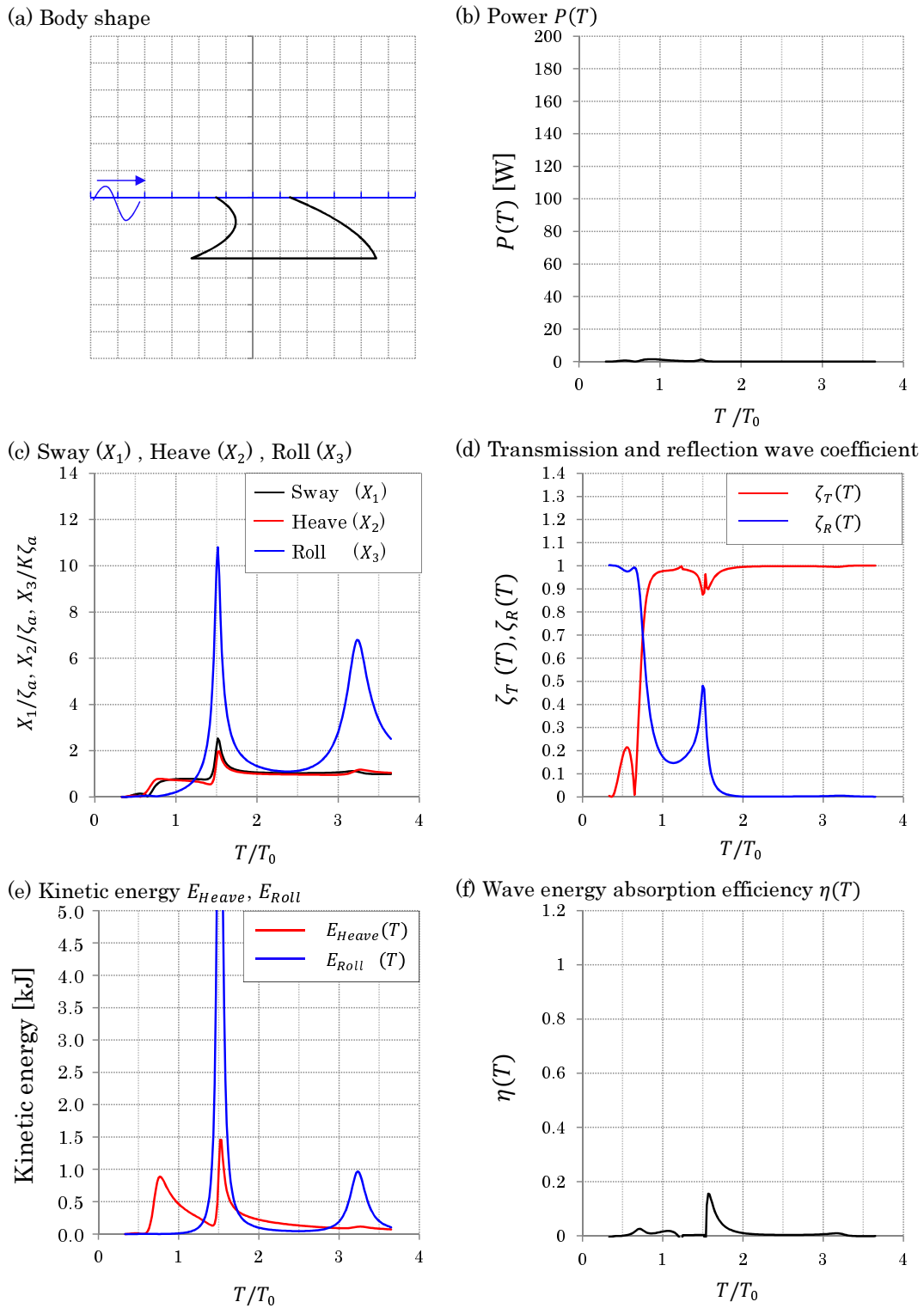


Fig. 3.34: Evaluation method2 - $B_1^{(8)}$ -.

・評価手法2：「応答振幅の大きさを評価」：9番目に評価値の高い形状 $B_1^{(9)}$

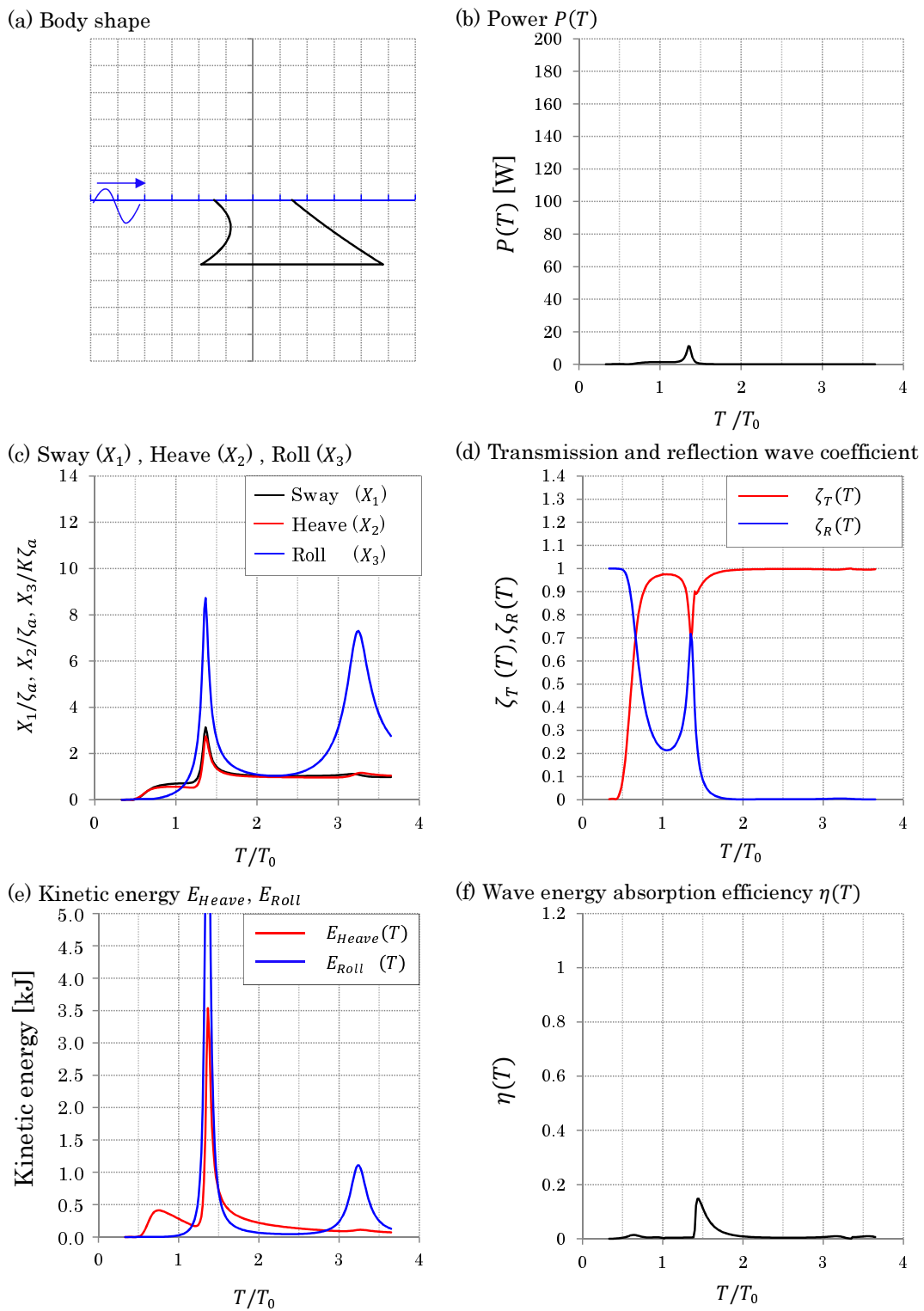
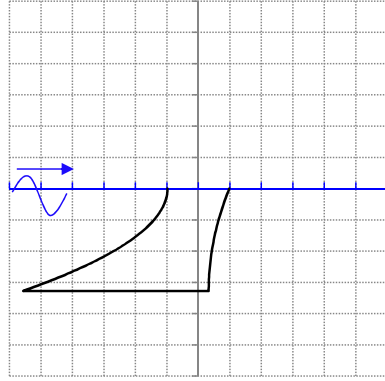


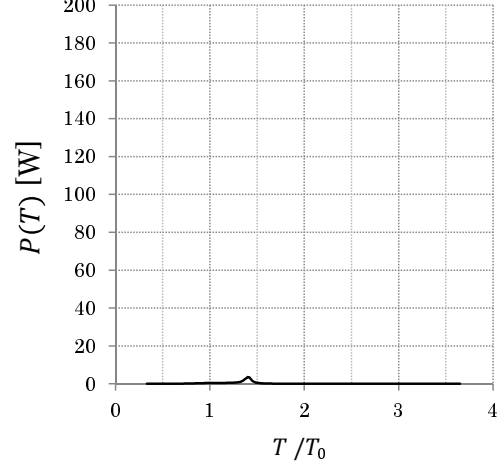
Fig. 3.35: Evaluation method2 - $B_1^{(9)}$ -.

・評価手法2：「応答振幅の大きさを評価」：10番目に評価値の高い形状 $B_1^{(10)}$

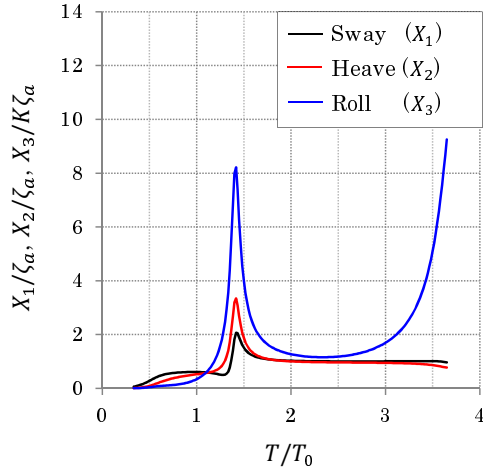
(a) Body shape



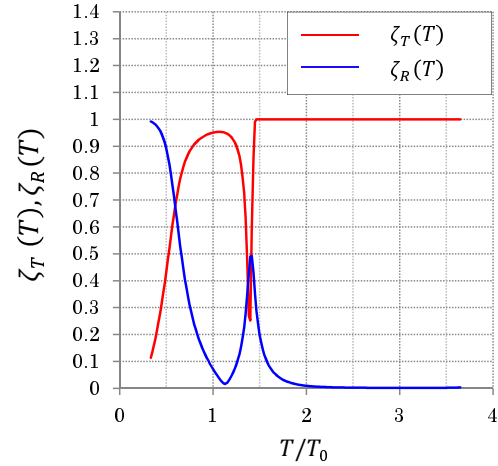
(b) Power $P(T)$



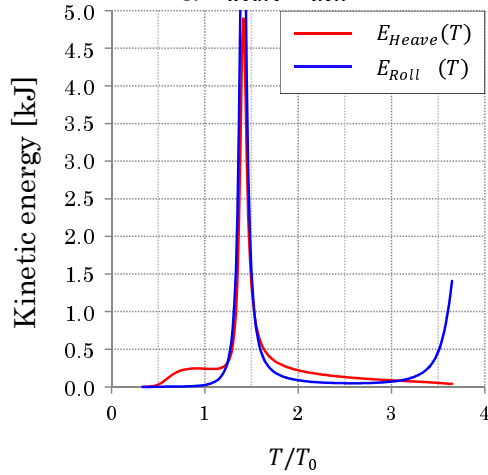
(c) Sway (X_1), Heave (X_2), Roll (X_3)



(d) Transmission and reflection wave coefficient



(e) Kinetic energy E_{Heave}, E_{Roll}



(f) Wave energy absorption efficiency $\eta(T)$

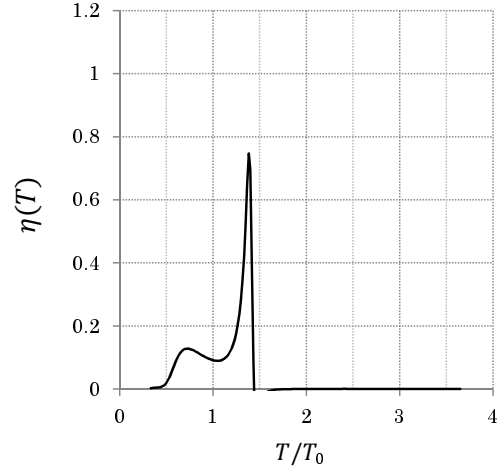
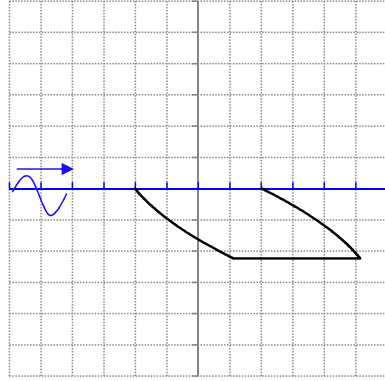


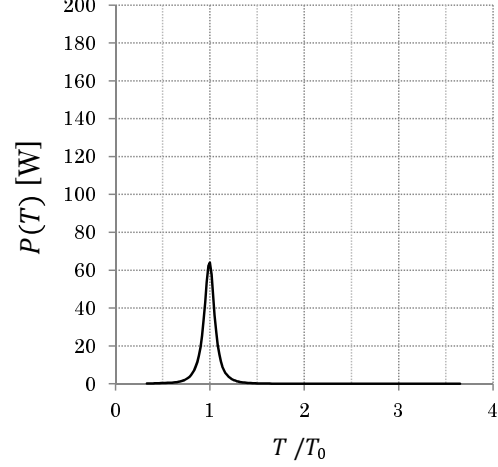
Fig. 3.36: Evaluation method2 - $B_1^{(10)}$ -.

・評価手法3:「運動エネルギーで評価」:最も評価値の高い形状 $C_1^{(1)}$

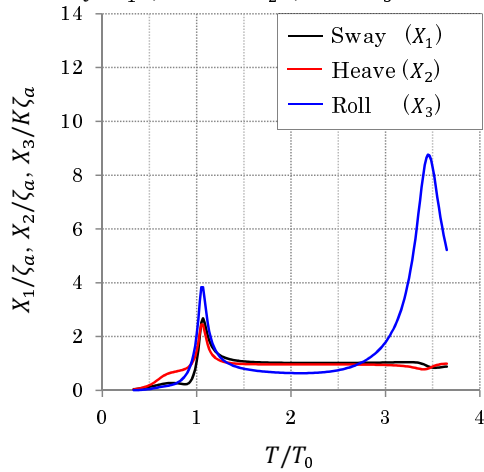
(a) Body shape



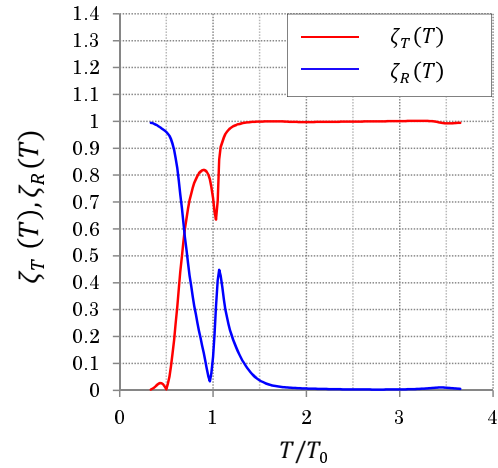
(b) Power $P(T)$



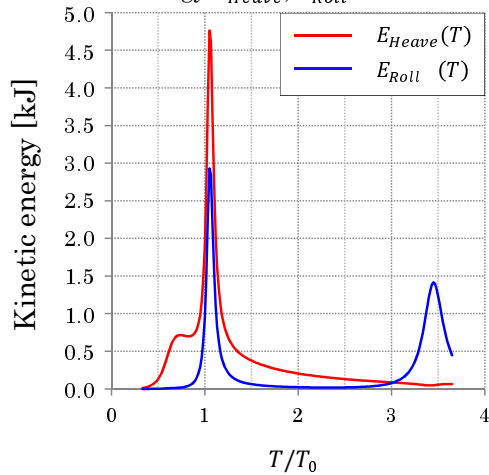
(c) Sway (X_1), Heave (X_2), Roll (X_3)



(d) Transmission and reflection wave coefficient



(e) Kinetic energy E_{Heave}, E_{Roll}



(f) Wave energy absorption efficiency $\eta(T)$

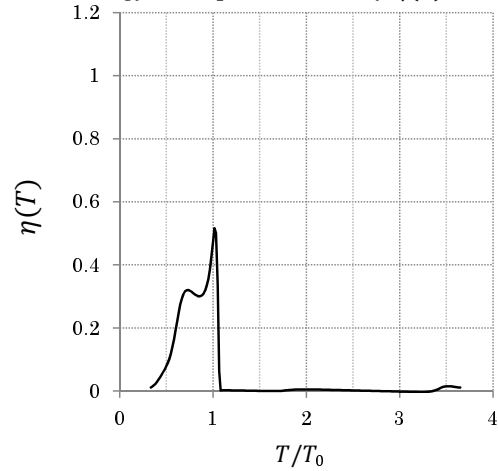
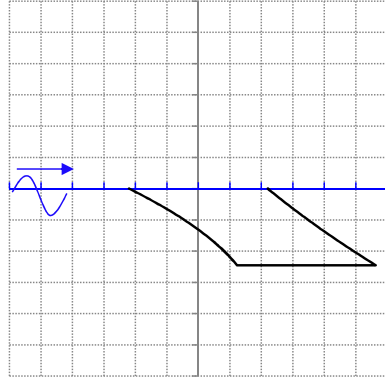


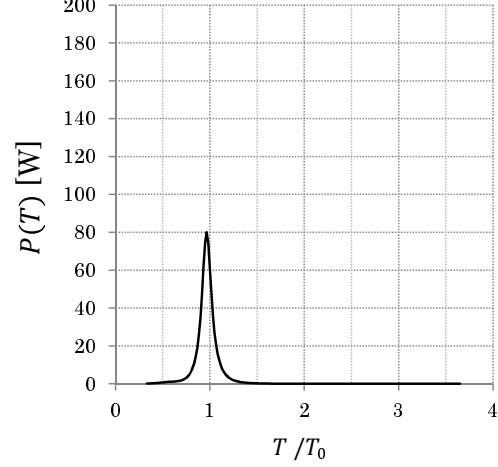
Fig. 3.37: Evaluation method3 - $C_1^{(1)}$ -.

・評価手法3：「運動エネルギーで評価」：2番目に評価値の高い形状 $C_1^{(2)}$

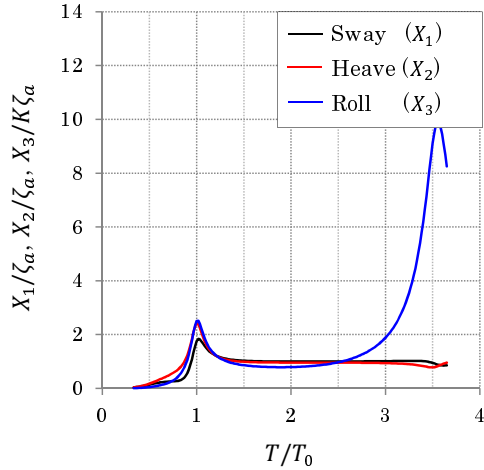
(a) Body shape



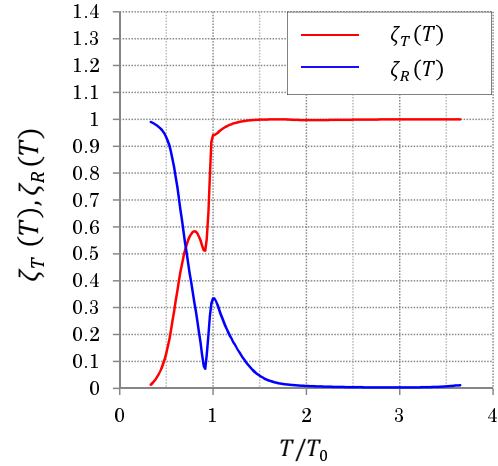
(b) Power $P(T)$



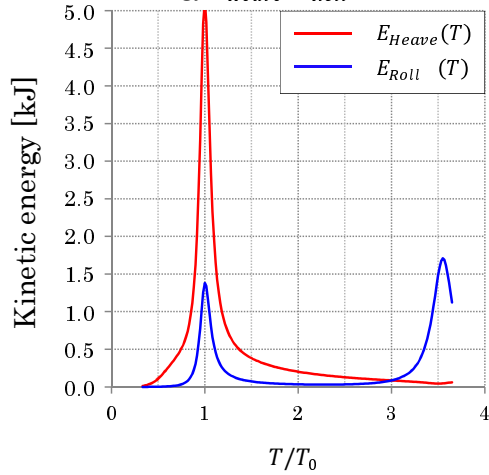
(c) Sway (X_1), Heave (X_2), Roll (X_3)



(d) Transmission and reflection wave coefficient



(e) Kinetic energy E_{Heave}, E_{Roll}



(f) Wave energy absorption efficiency $\eta(T)$

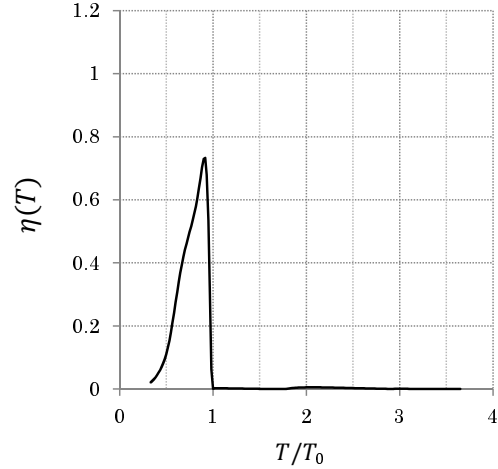
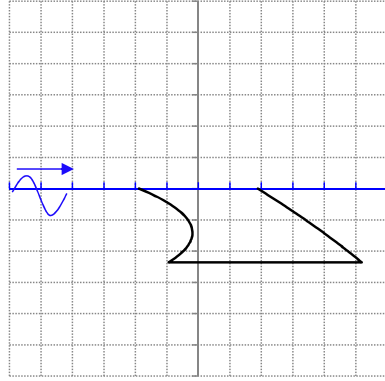


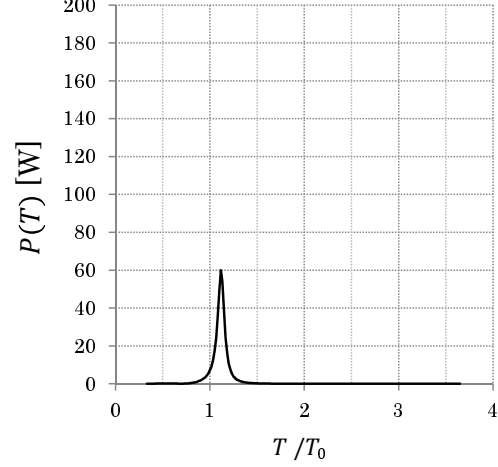
Fig. 3.38: Evaluation method3 - $C_1^{(2)}$ -.

・評価手法3:「運動エネルギーで評価」:3番目に評価値の高い形状 $C_1^{(3)}$

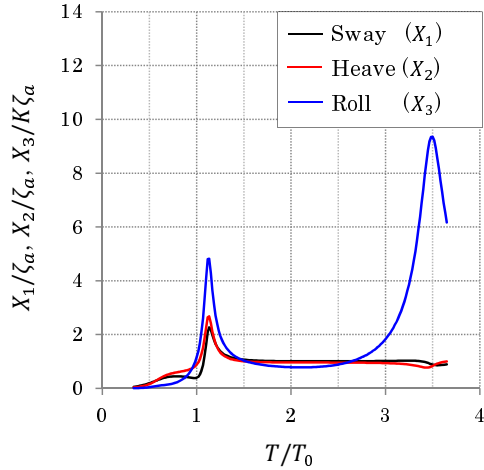
(a) Body shape



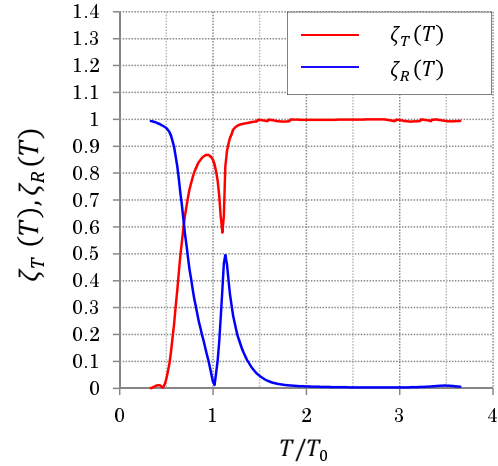
(b) Power $P(T)$



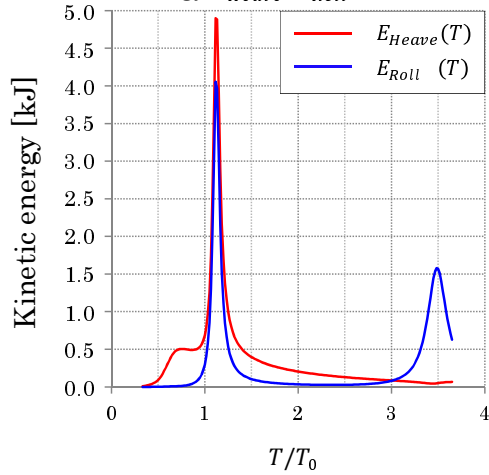
(c) Sway (X_1), Heave (X_2), Roll (X_3)



(d) Transmission and reflection wave coefficient



(e) Kinetic energy E_{Heave}, E_{Roll}



(f) Wave energy absorption efficiency $\eta(T)$

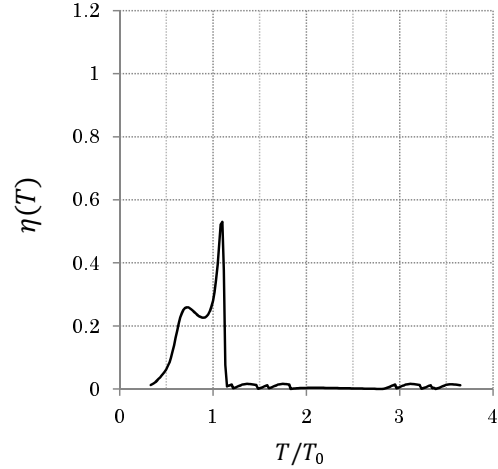


Fig. 3.39: Evaluation method3 - $C_1^{(3)}$ -.

・評価手法3:「運動エネルギーで評価」:4番目に評価値の高い形状 $C_1^{(4)}$

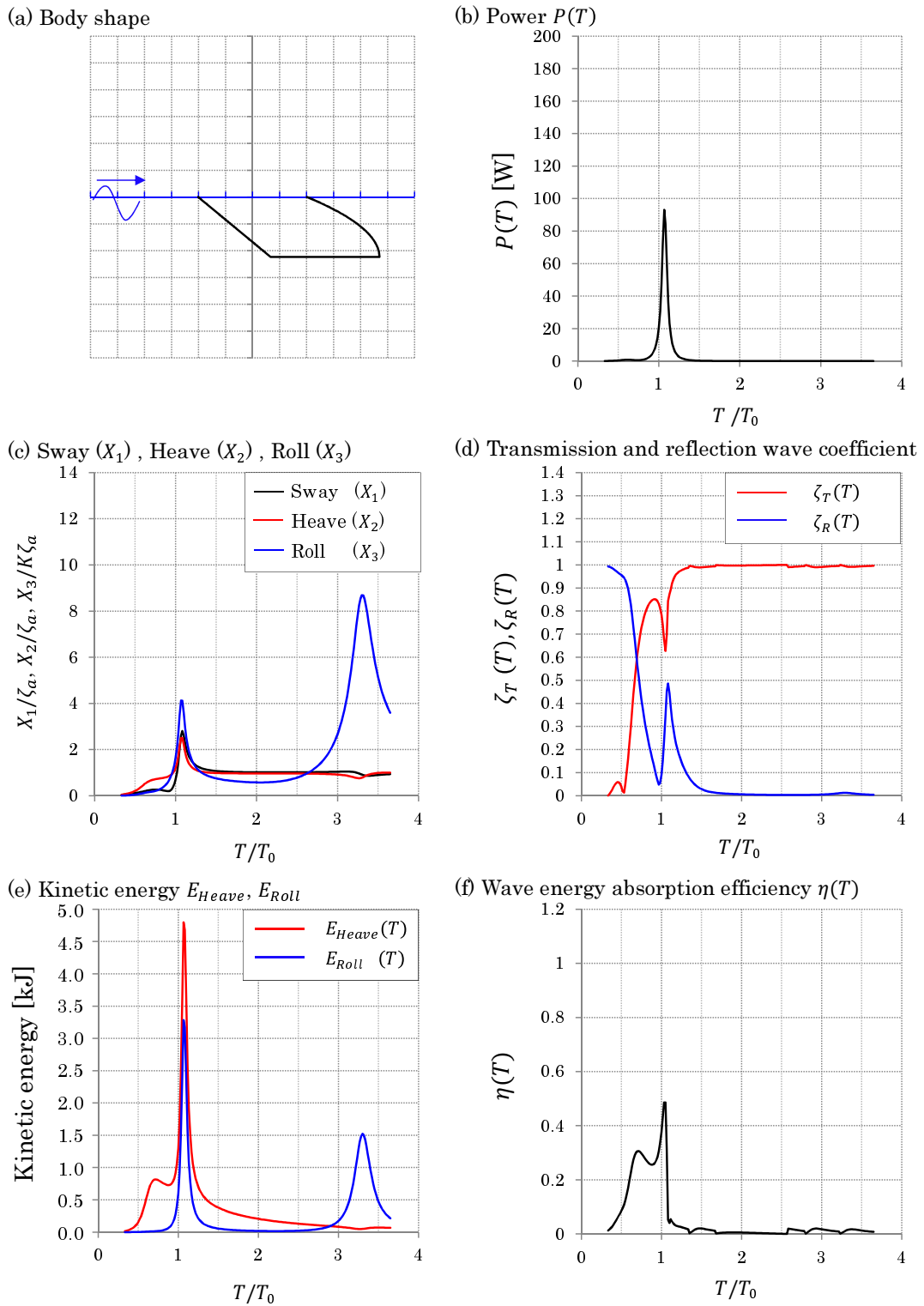
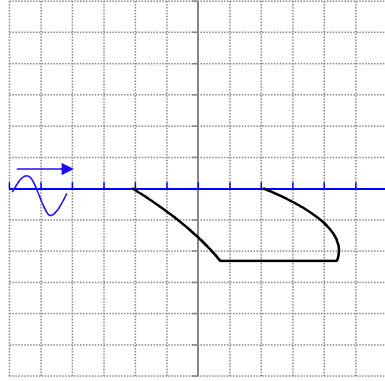


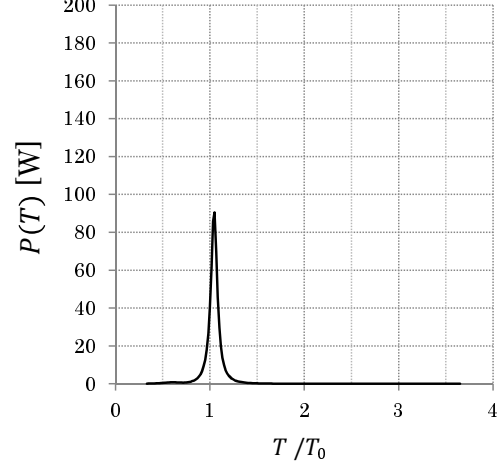
Fig. 3.40: Evaluation method3 - $C_1^{(4)}$ -.

・評価手法3：「運動エネルギーで評価」：5番目に評価値の高い形状 $C_1^{(5)}$

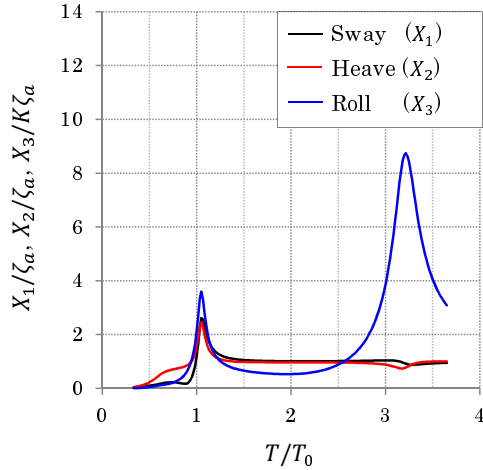
(a) Body shape



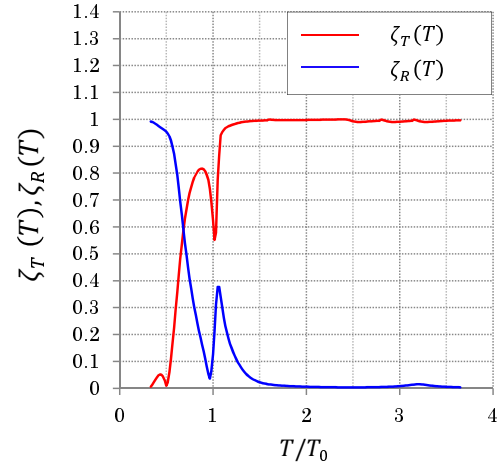
(b) Power $P(T)$



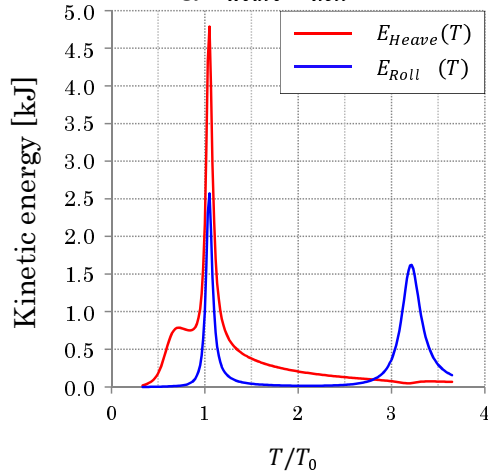
(c) Sway (X_1), Heave (X_2), Roll (X_3)



(d) Transmission and reflection wave coefficient



(e) Kinetic energy E_{Heave}, E_{Roll}



(f) Wave energy absorption efficiency $\eta(T)$

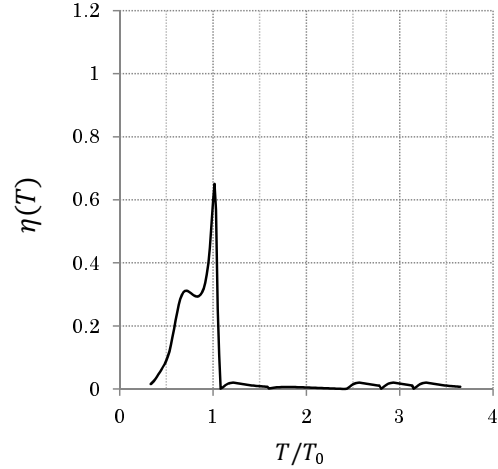
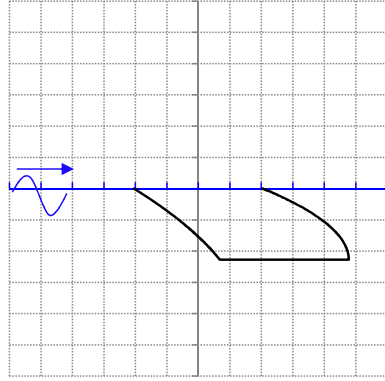


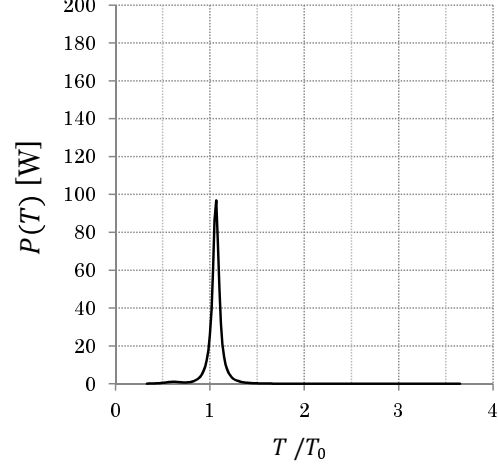
Fig. 3.41: Evaluation method3 - $C_1^{(5)}$ -.

・評価手法3：「運動エネルギーで評価」：6番目に評価値の高い形状 $C_1^{(6)}$

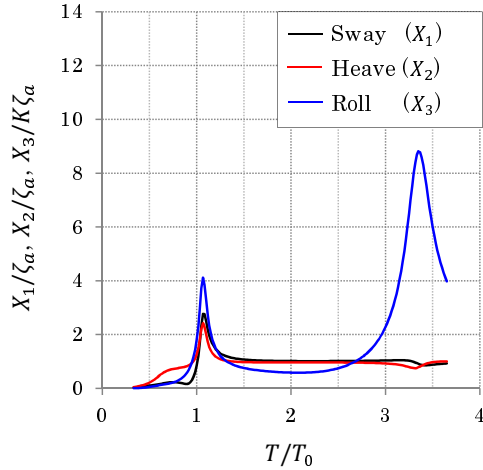
(a) Body shape



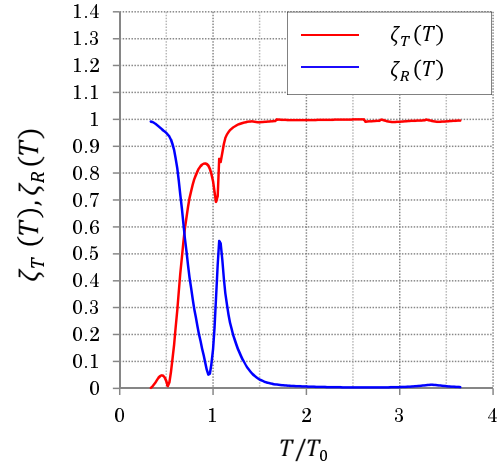
(b) Power $P(T)$



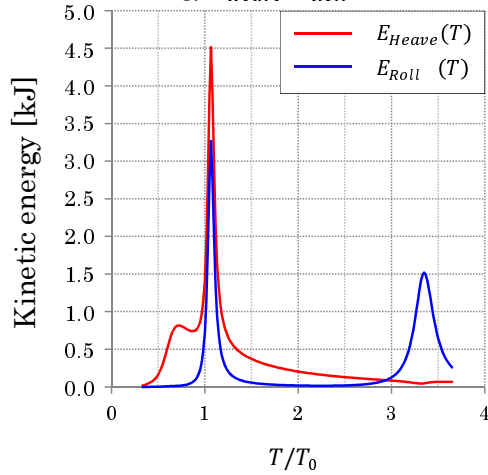
(c) Sway (X_1), Heave (X_2), Roll (X_3)



(d) Transmission and reflection wave coefficient



(e) Kinetic energy E_{Heave}, E_{Roll}



(f) Wave energy absorption efficiency $\eta(T)$

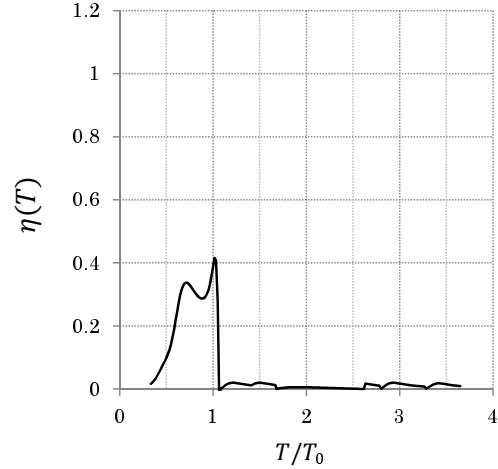
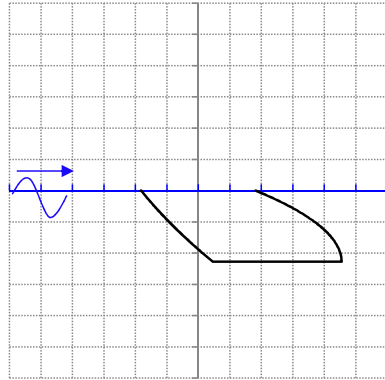


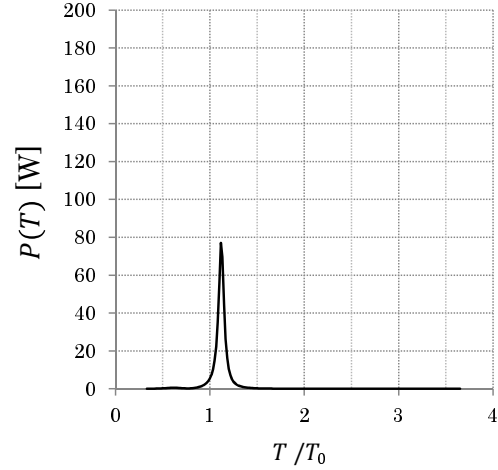
Fig. 3.42: Evaluation method3 - $C_1^{(6)}$ -.

・評価手法3：「運動エネルギーで評価」：7番目に評価値の高い形状 $C_1^{(7)}$

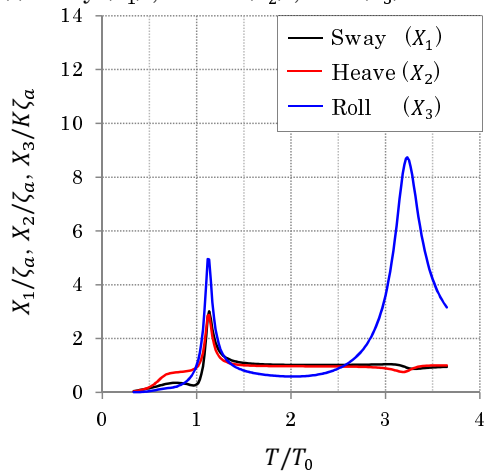
(a) Body shape



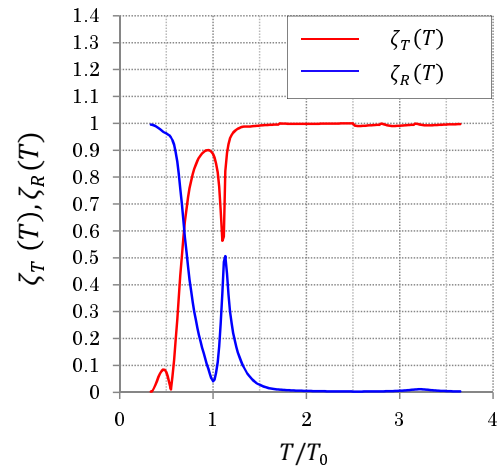
(b) Power $P(T)$



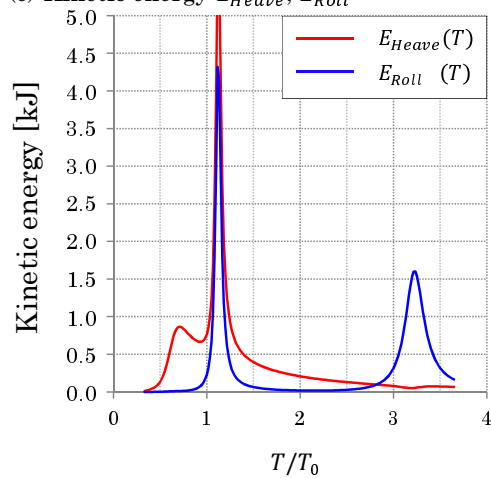
(c) Sway (X_1), Heave (X_2), Roll (X_3)



(d) Transmission and reflection wave coefficient



(e) Kinetic energy E_{Heave}, E_{Roll}



(f) Wave energy absorption efficiency $\eta(T)$

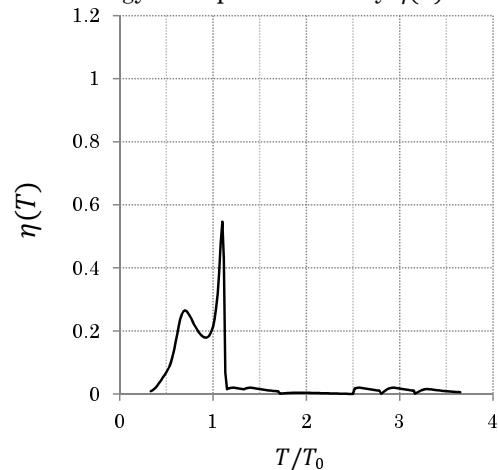
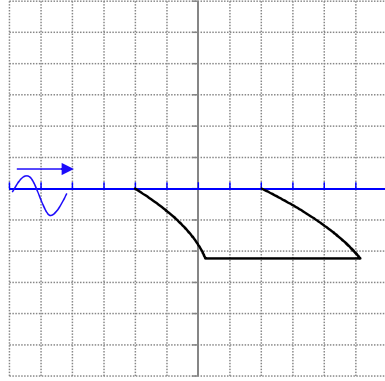


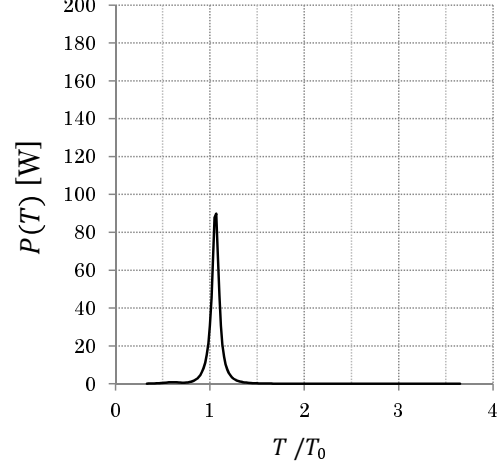
Fig. 3.43: Evaluation method3 - $C_1^{(7)}$ -.

・評価手法3:「運動エネルギーで評価」:8番目に評価値の高い形状 $C_1^{(8)}$

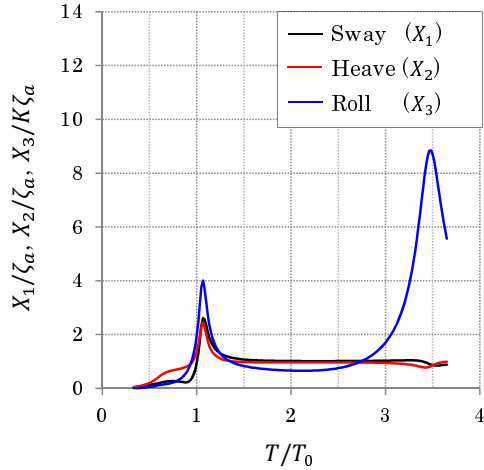
(a) Body shape



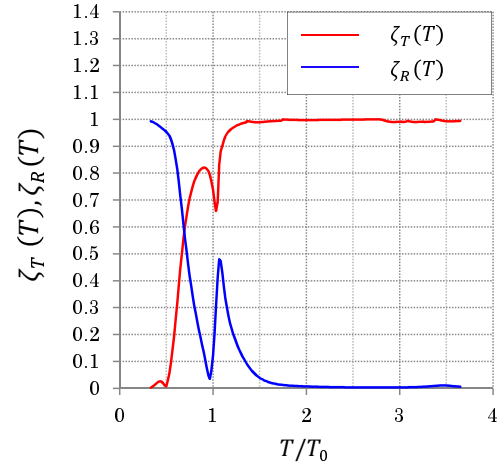
(b) Power $P(T)$



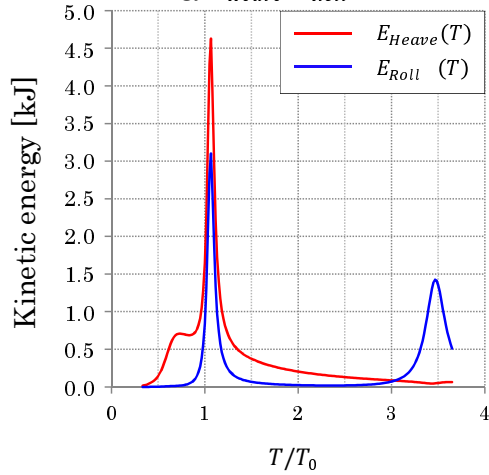
(c) Sway (X_1), Heave (X_2), Roll (X_3)



(d) Transmission and reflection wave coefficient



(e) Kinetic energy E_{Heave}, E_{Roll}



(f) Wave energy absorption efficiency $\eta(T)$

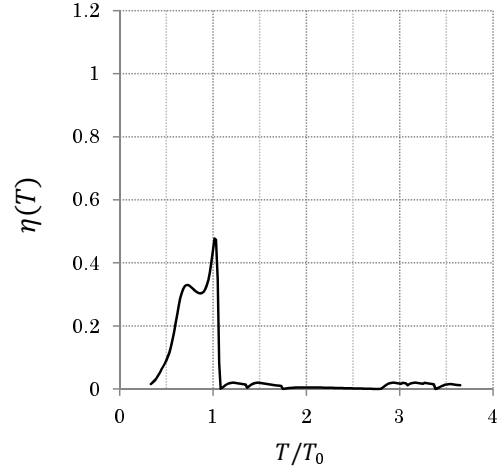
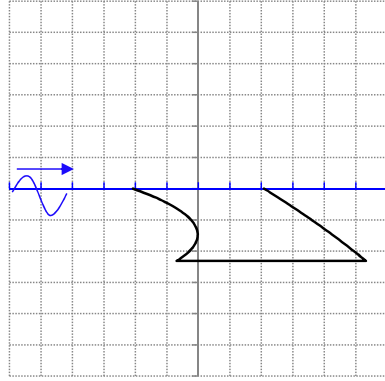


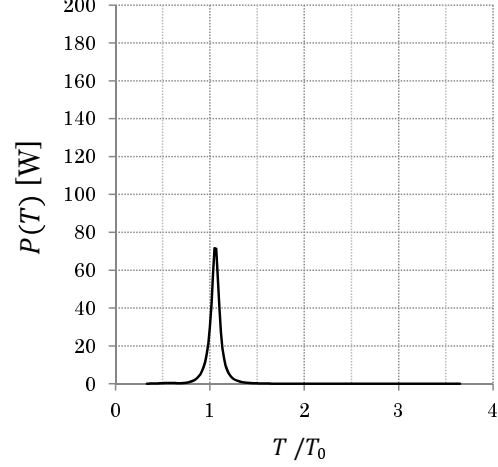
Fig. 3.44: Evaluation method3 - $C_1^{(8)}$ -.

・評価手法3:「運動エネルギーで評価」:9番目に評価値の高い形状 $C_1^{(9)}$

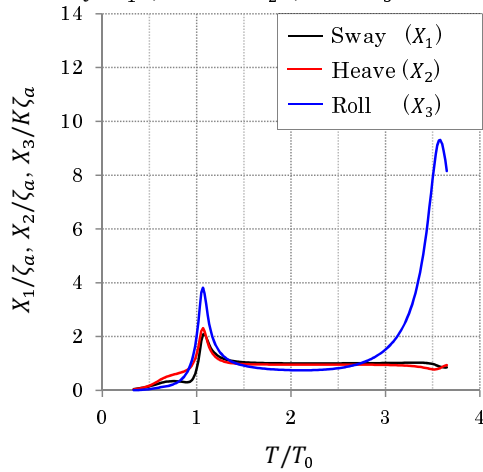
(a) Body shape



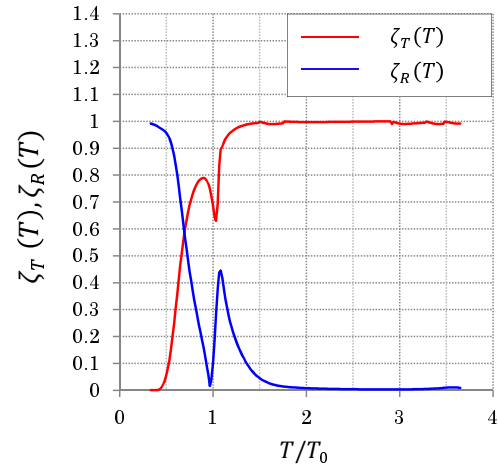
(b) Power $P(T)$



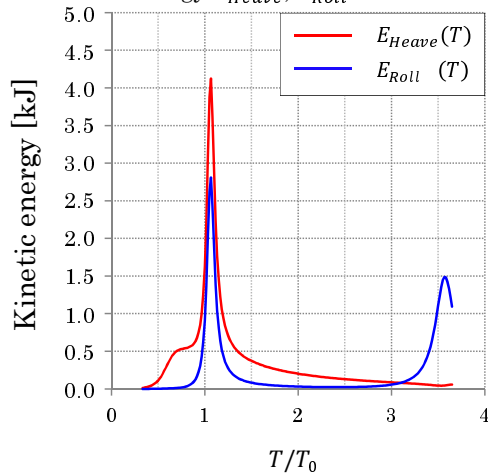
(c) Sway (X_1), Heave (X_2), Roll (X_3)



(d) Transmission and reflection wave coefficient



(e) Kinetic energy E_{Heave}, E_{Roll}



(f) Wave energy absorption efficiency $\eta(T)$

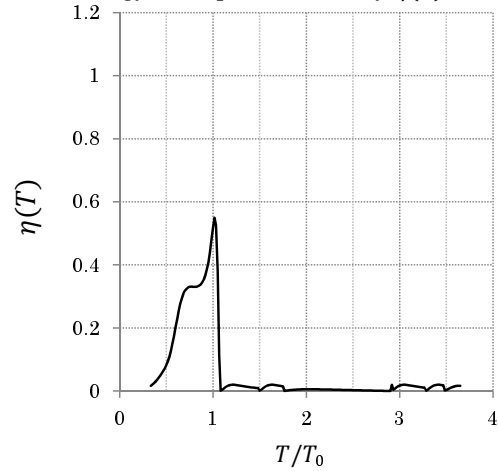


Fig. 3.45: Evaluation method3 - $C_1^{(9)}$ -.

・評価手法3：「運動エネルギーで評価」：10番目に評価値の高い形状 $C_1^{(10)}$

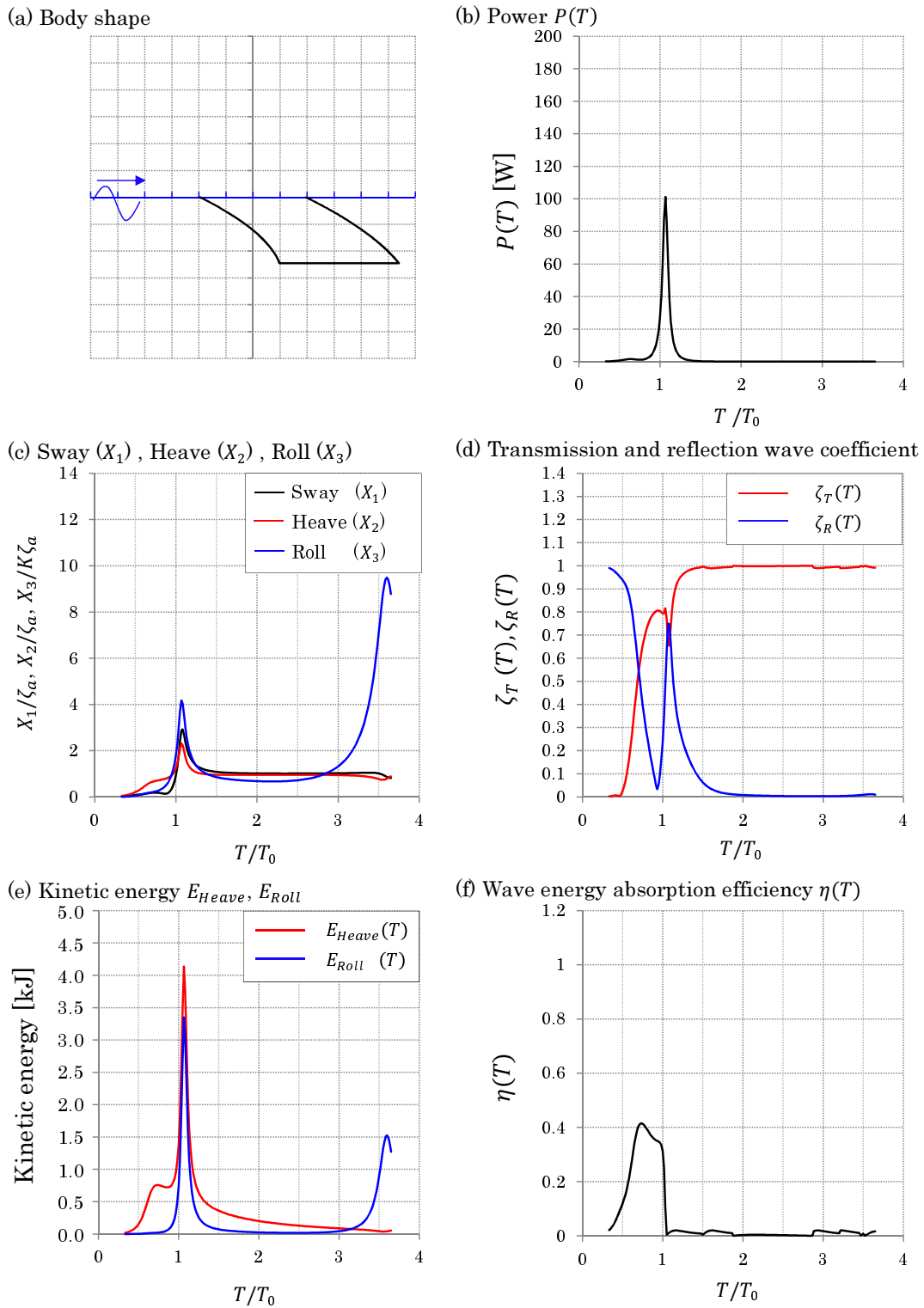
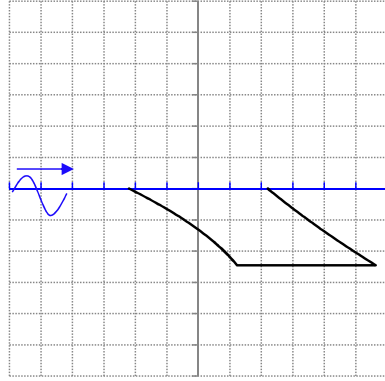


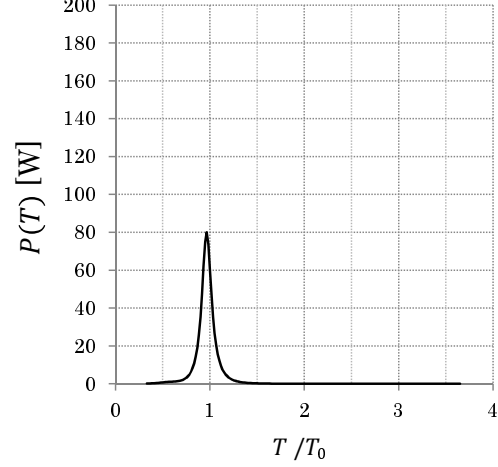
Fig. 3.46: Evaluation method3 - $C_1^{(10)}$ -.

・評価手法4:「エネルギー吸収機構の吸収量で評価」:最も評価値の高い形状 $D_1^{(1)}$

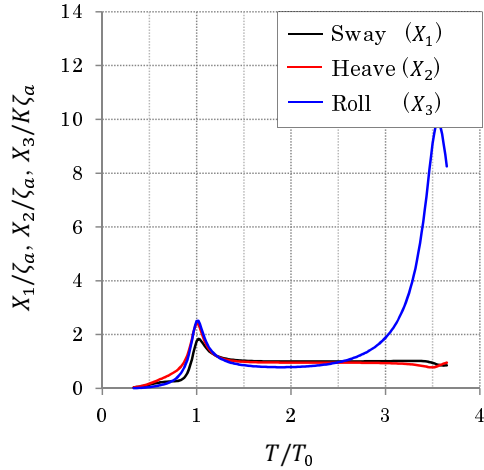
(a) Body shape



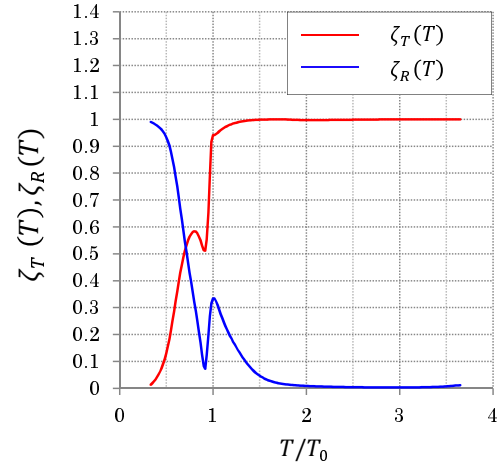
(b) Power $P(T)$



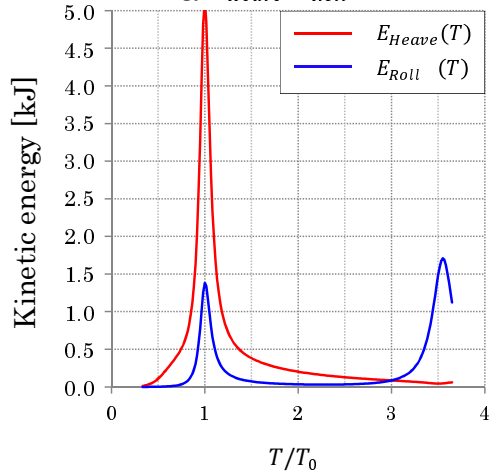
(c) Sway (X_1), Heave (X_2), Roll (X_3)



(d) Transmission and reflection wave coefficient



(e) Kinetic energy E_{Heave}, E_{Roll}



(f) Wave energy absorption efficiency $\eta(T)$

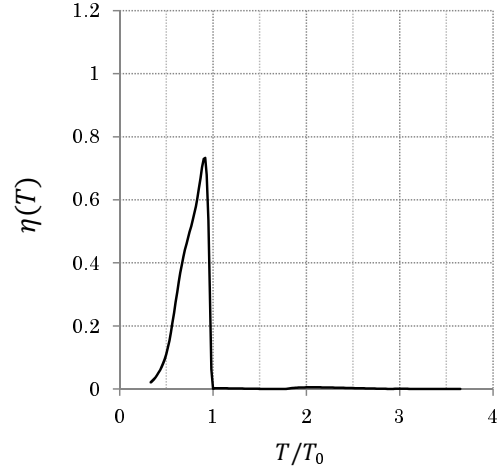
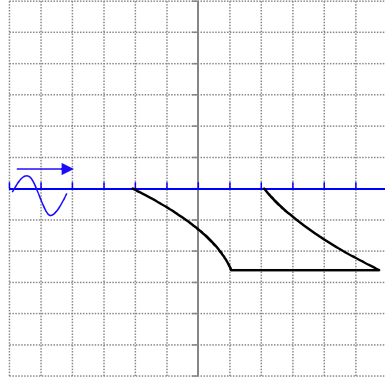


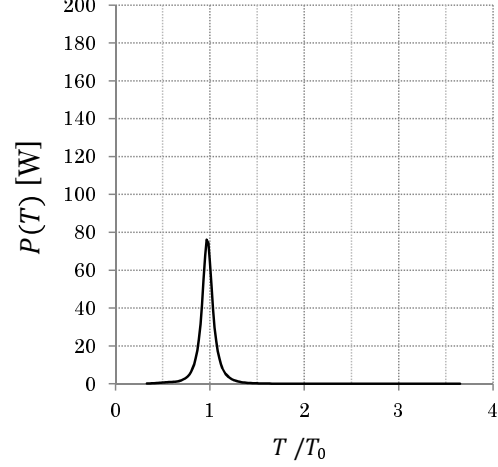
Fig. 3.47: Evaluation method4 - $D_1^{(1)}$ -.

・評価手法4:「エネルギー吸収機構の吸収量で評価」:2番目に評価値の高い形状 $D_1^{(2)}$

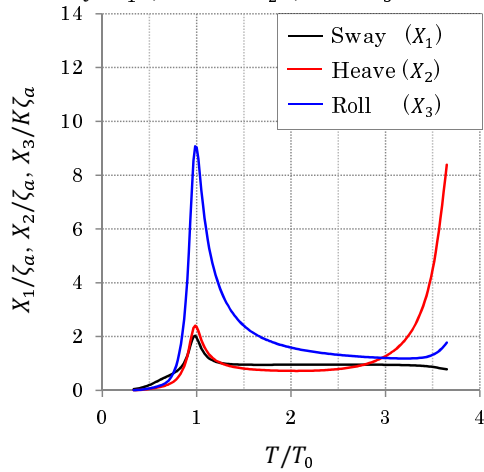
(a) Body shape



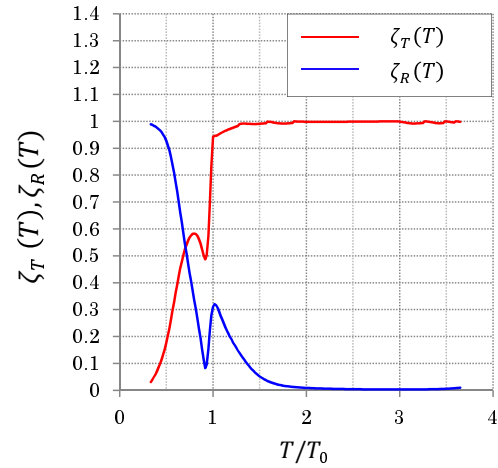
(b) Power $P(T)$



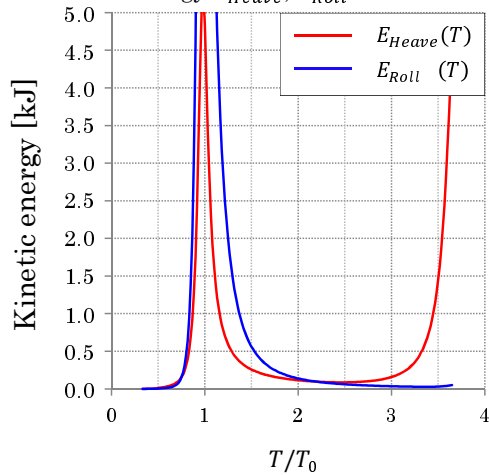
(c) Sway (X_1), Heave (X_2), Roll (X_3)



(d) Transmission and reflection wave coefficient



(e) Kinetic energy E_{Heave}, E_{Roll}



(f) Wave energy absorption efficiency $\eta(T)$

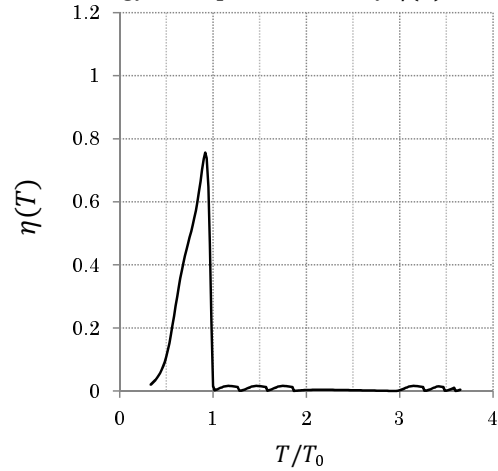
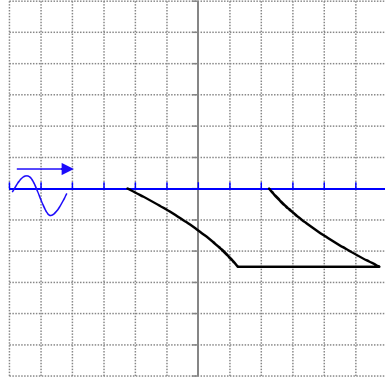


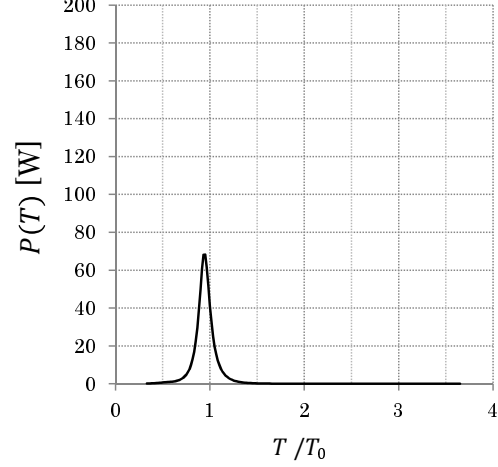
Fig. 3.48: Evaluation method4 - $D_1^{(2)}$ -.

・評価手法4:「エネルギー吸収機構の吸収量で評価」:3番目に評価値の高い形状 $D_1^{(3)}$

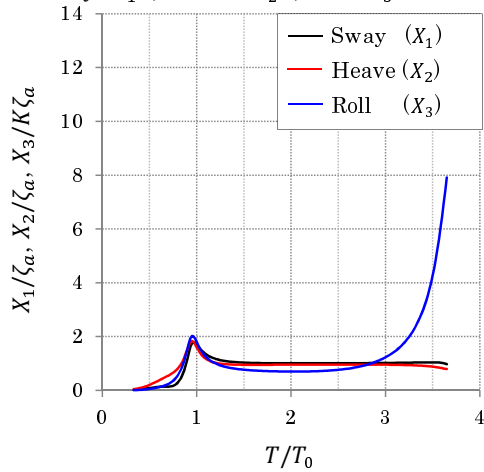
(a) Body shape



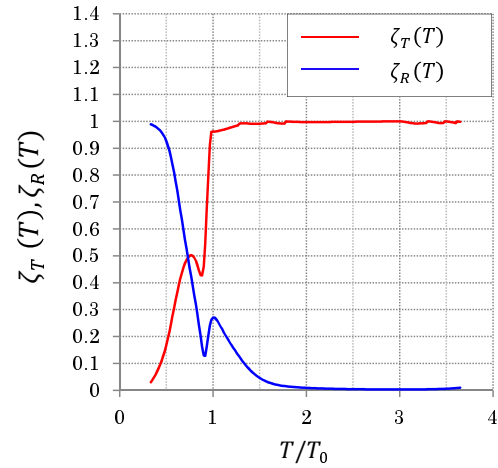
(b) Power $P(T)$



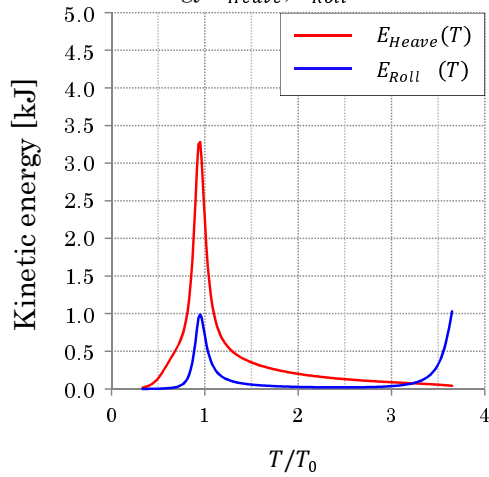
(c) Sway (X_1), Heave (X_2), Roll (X_3)



(d) Transmission and reflection wave coefficient



(e) Kinetic energy E_{Heave}, E_{Roll}



(f) Wave energy absorption efficiency $\eta(T)$

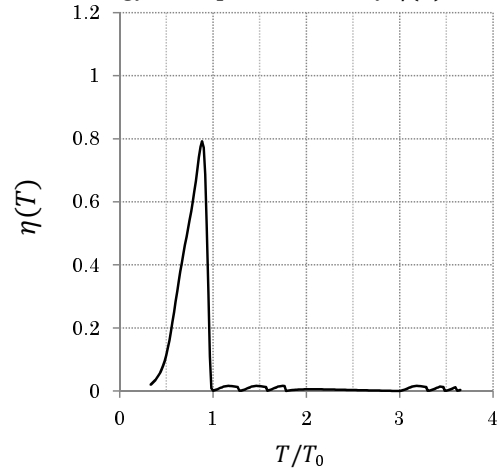
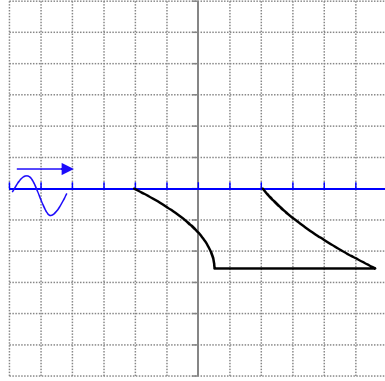


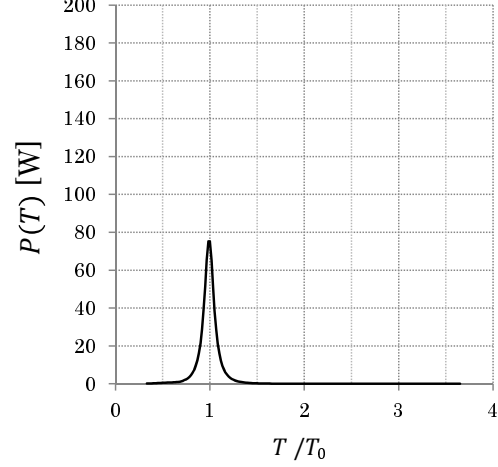
Fig. 3.49: Evaluation method4 - $D_1^{(3)}$ -.

・評価手法4:「エネルギー吸収機構の吸収量で評価」:4番目に評価値の高い形状 $D_1^{(4)}$

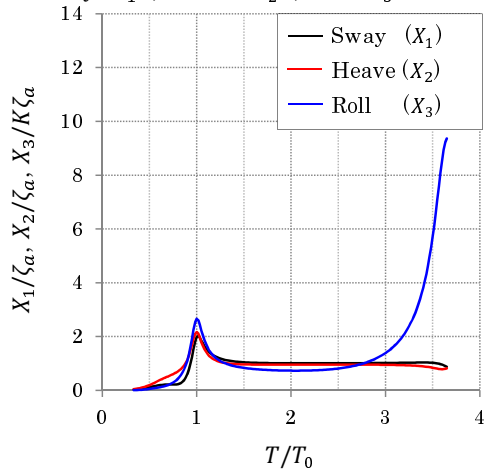
(a) Body shape



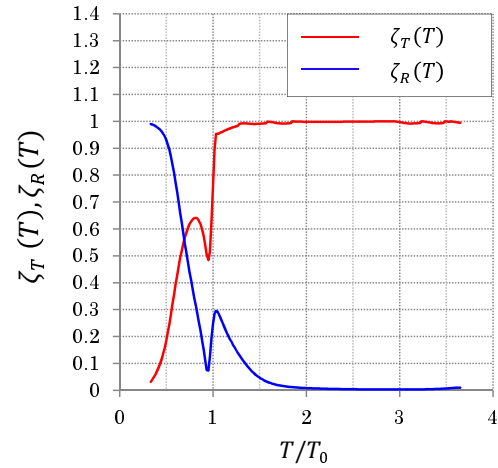
(b) Power $P(T)$



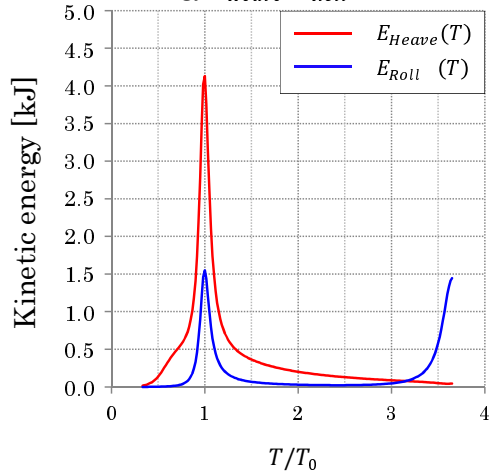
(c) Sway (X_1), Heave (X_2), Roll (X_3)



(d) Transmission and reflection wave coefficient



(e) Kinetic energy E_{Heave}, E_{Roll}



(f) Wave energy absorption efficiency $\eta(T)$

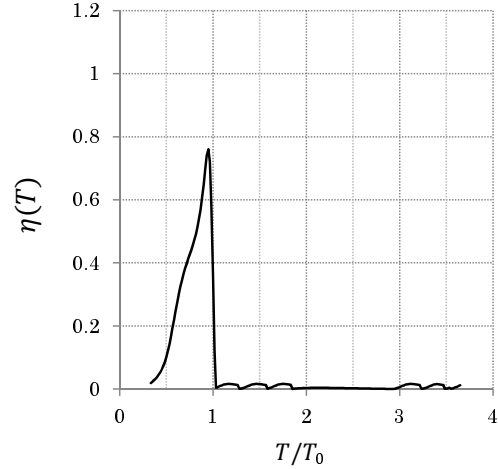
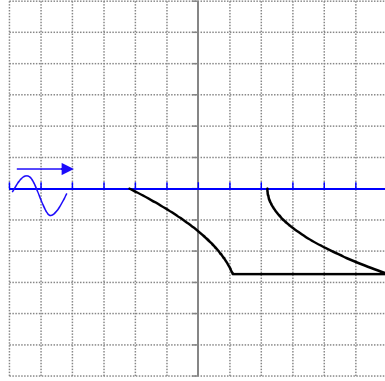


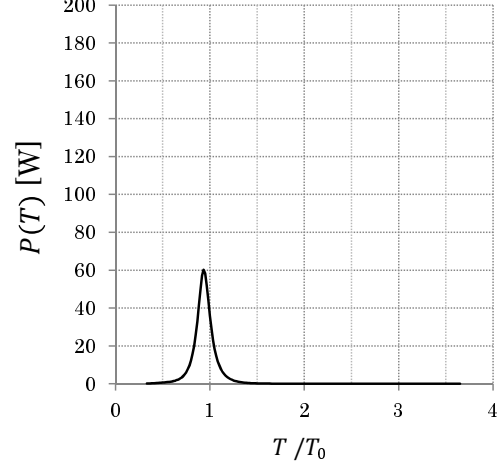
Fig. 3.50: Evaluation method4 - $D_1^{(4)}$ -.

・評価手法4:「エネルギー吸収機構の吸収量で評価」:5番目に評価値の高い形状 $D_1^{(5)}$

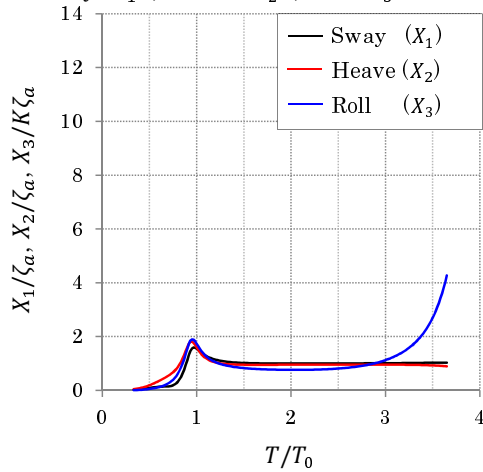
(a) Body shape



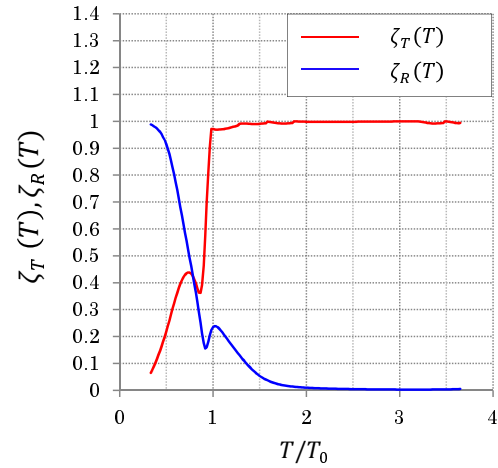
(b) Power $P(T)$



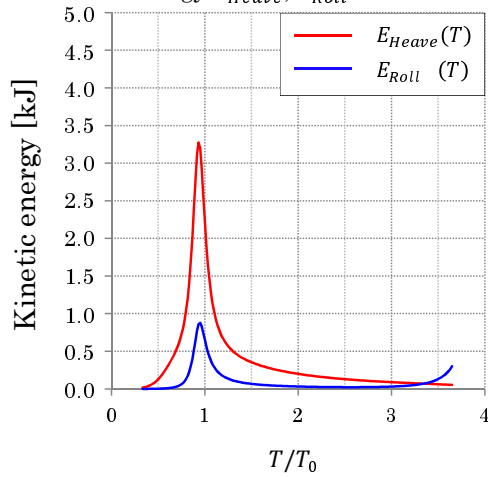
(c) Sway (X_1), Heave (X_2), Roll (X_3)



(d) Transmission and reflection wave coefficient



(e) Kinetic energy E_{Heave}, E_{Roll}



(f) Wave energy absorption efficiency $\eta(T)$

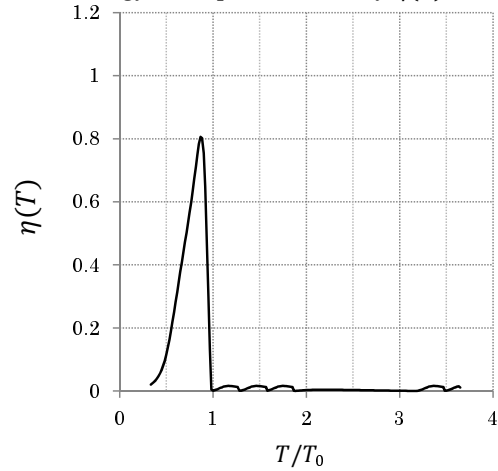
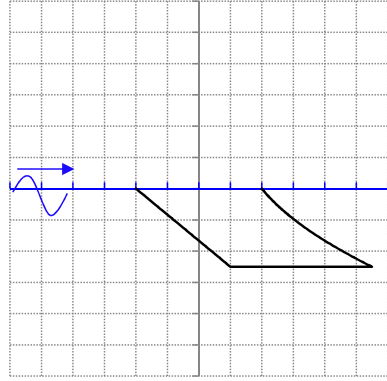


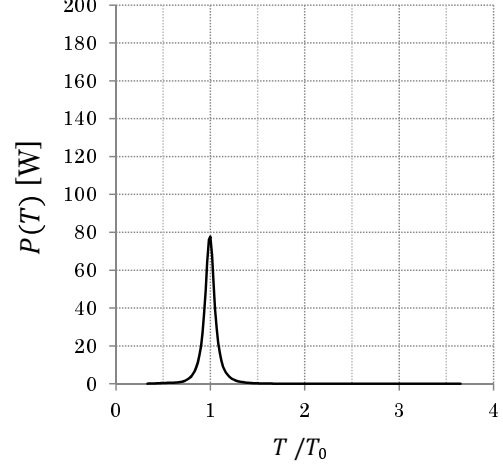
Fig. 3.51: Evaluation method4 - $D_1^{(5)}$ -.

・評価手法4:「エネルギー吸収機構の吸収量で評価」:6番目に評価値の高い形状 $D_1^{(6)}$

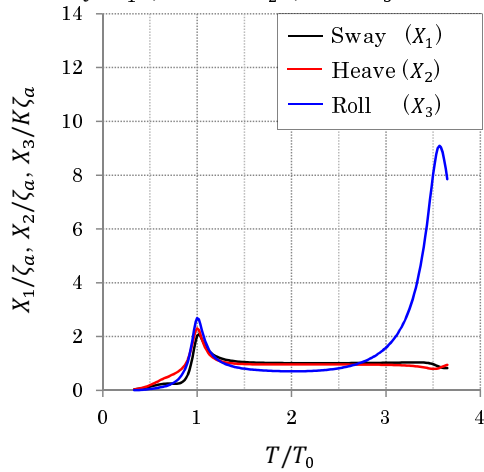
(a) Body shape



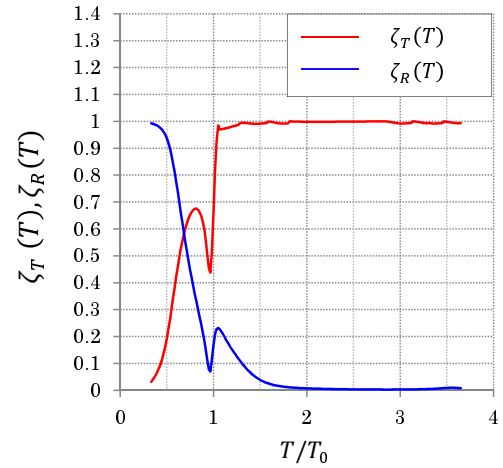
(b) Power $P(T)$



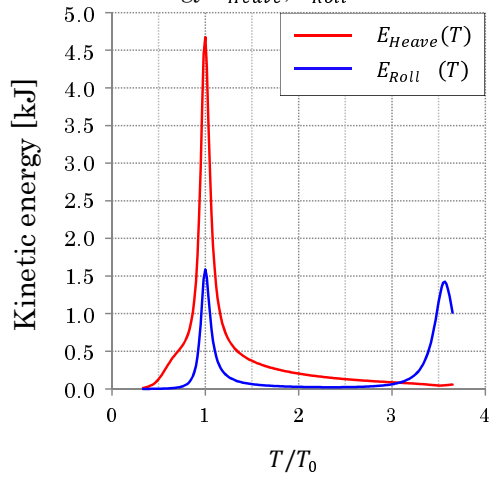
(c) Sway (X_1), Heave (X_2), Roll (X_3)



(d) Transmission and reflection wave coefficient



(e) Kinetic energy E_{Heave}, E_{Roll}



(f) Wave energy absorption efficiency $\eta(T)$

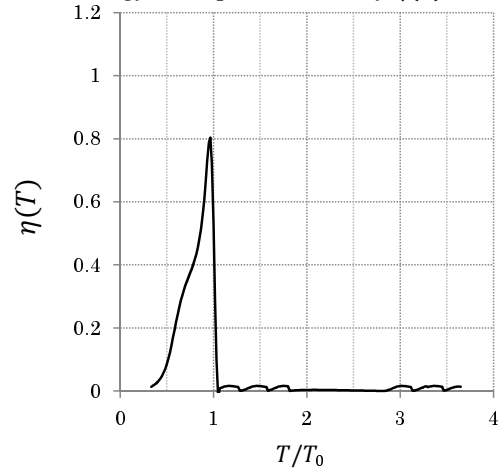
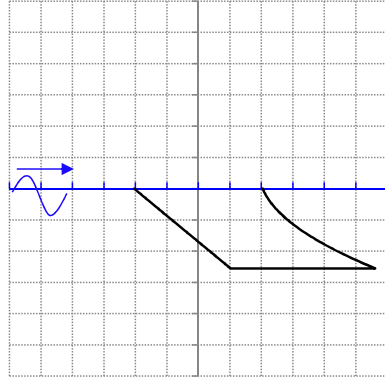


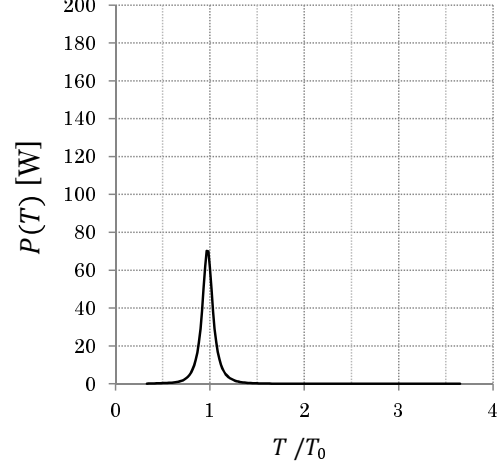
Fig. 3.52: Evaluation method4 - $D_1^{(6)}$ -.

・評価手法4:「エネルギー吸収機構の吸収量で評価」:7番目に評価値の高い形状 $D_1^{(7)}$

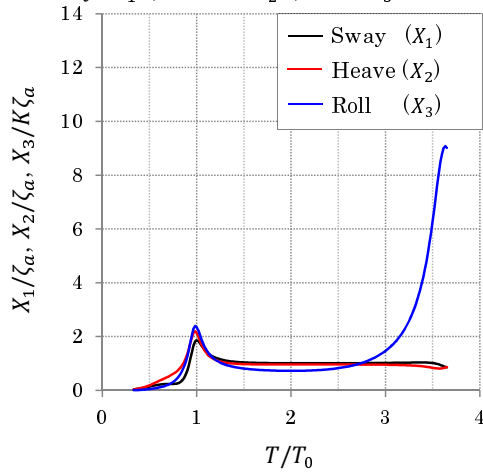
(a) Body shape



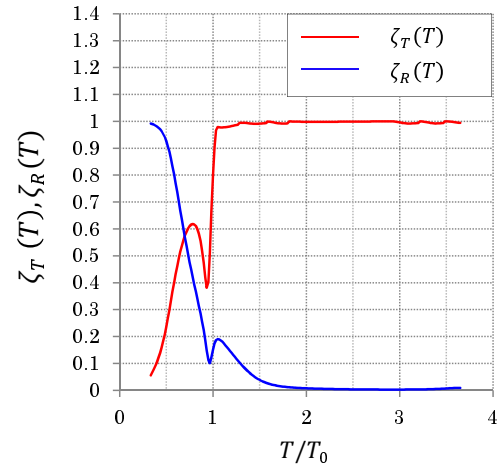
(b) Power $P(T)$



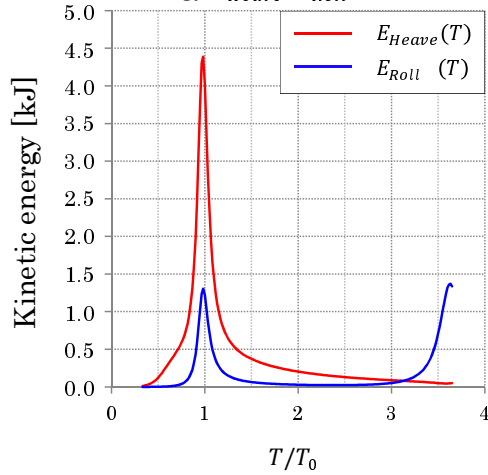
(c) Sway (X_1), Heave (X_2), Roll (X_3)



(d) Transmission and reflection wave coefficient



(e) Kinetic energy E_{Heave}, E_{Roll}



(f) Wave energy absorption efficiency $\eta(T)$

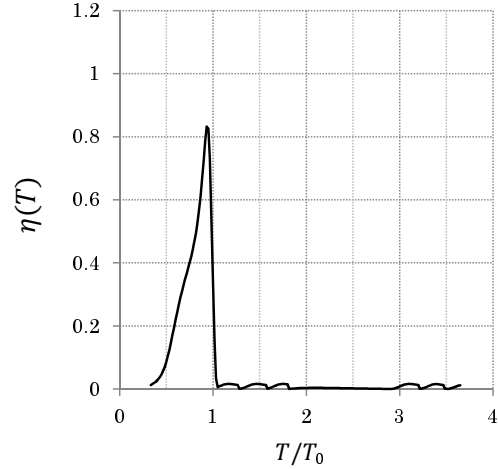
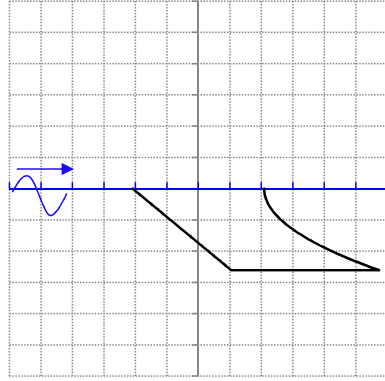


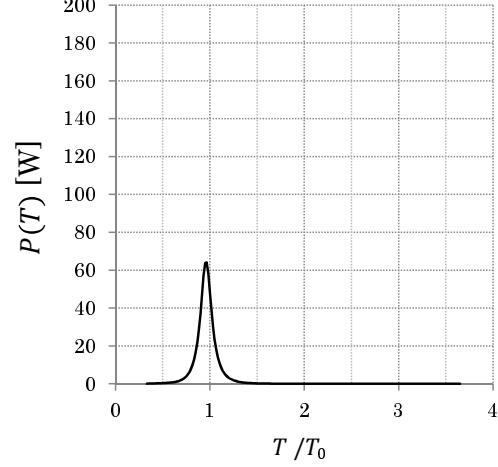
Fig. 3.53: Evaluation method4 - $D_1^{(7)}$ -.

・評価手法4:「エネルギー吸収機構の吸収量で評価」:8番目に評価値の高い形状 $D_1^{(8)}$

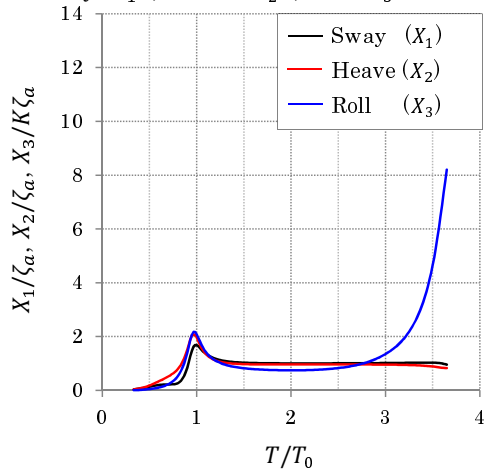
(a) Body shape



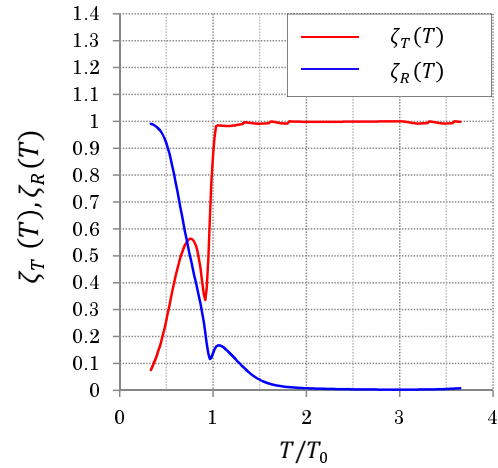
(b) Power $P(T)$



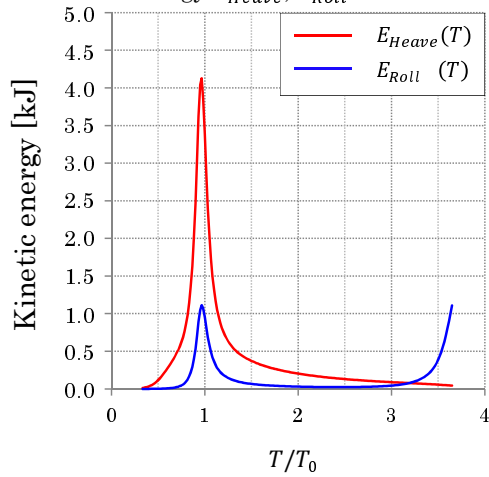
(c) Sway (X_1), Heave (X_2), Roll (X_3)



(d) Transmission and reflection wave coefficient



(e) Kinetic energy E_{Heave}, E_{Roll}



(f) Wave energy absorption efficiency $\eta(T)$

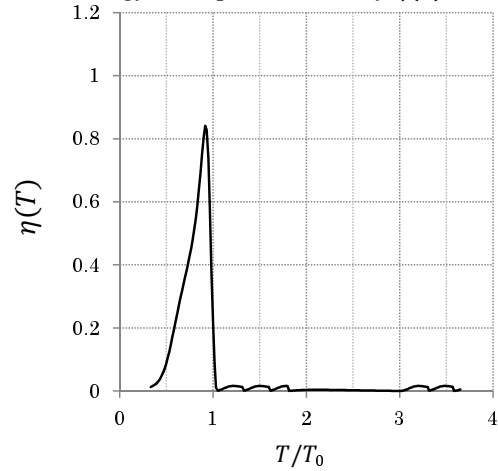
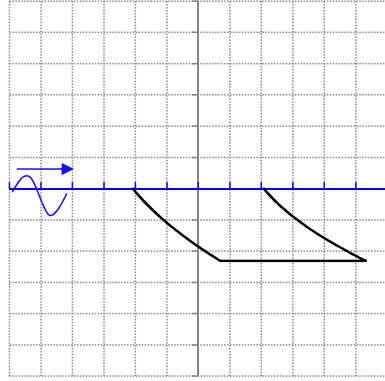


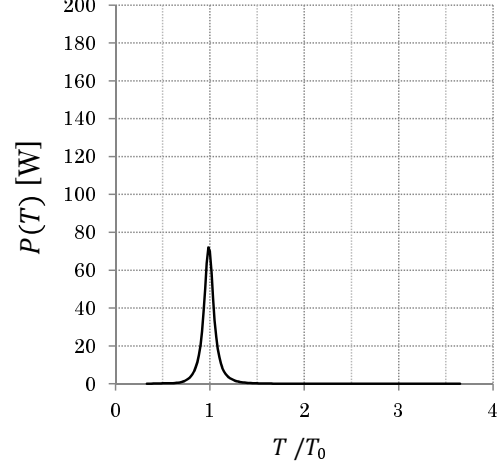
Fig. 3.54: Evaluation method4 - $D_1^{(8)}$ -.

・評価手法4:「エネルギー吸収機構の吸収量で評価」:9番目に評価値の高い形状 $D_1^{(9)}$

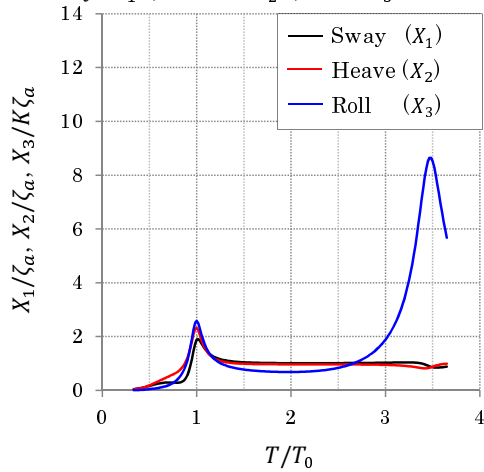
(a) Body shape



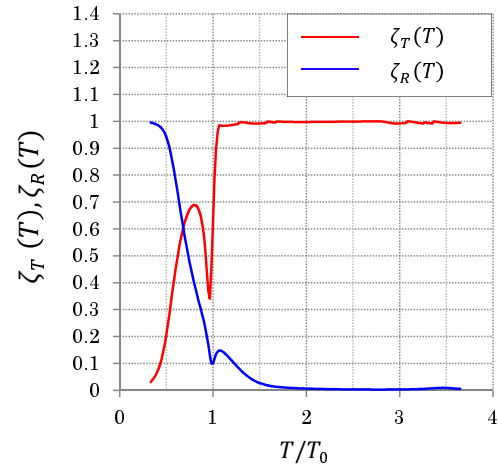
(b) Power $P(T)$



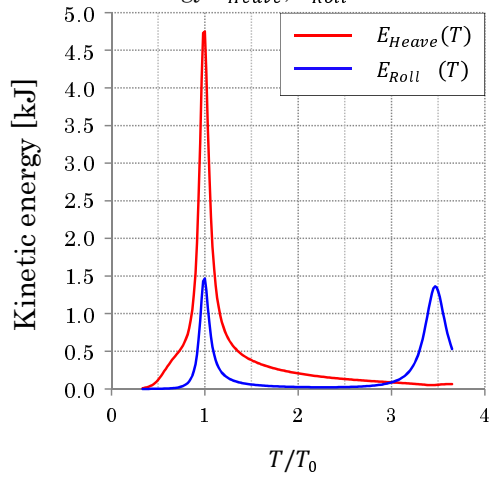
(c) Sway (X_1), Heave (X_2), Roll (X_3)



(d) Transmission and reflection wave coefficient



(e) Kinetic energy E_{Heave}, E_{Roll}



(f) Wave energy absorption efficiency $\eta(T)$

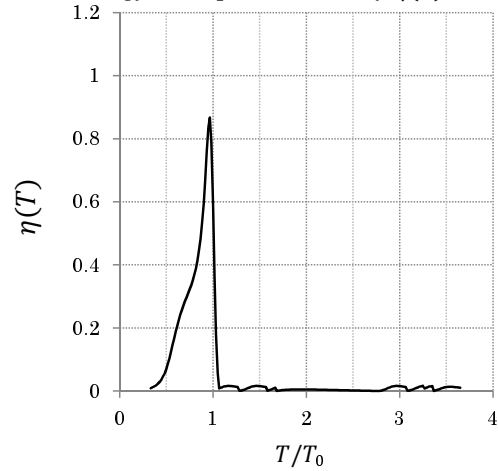


Fig. 3.55: Evaluation method4 - $D_1^{(9)}$ -.

・評価手法4:「エネルギー吸収機構の吸収量で評価」:10番目に評価値の高い形状 $D_1^{(10)}$

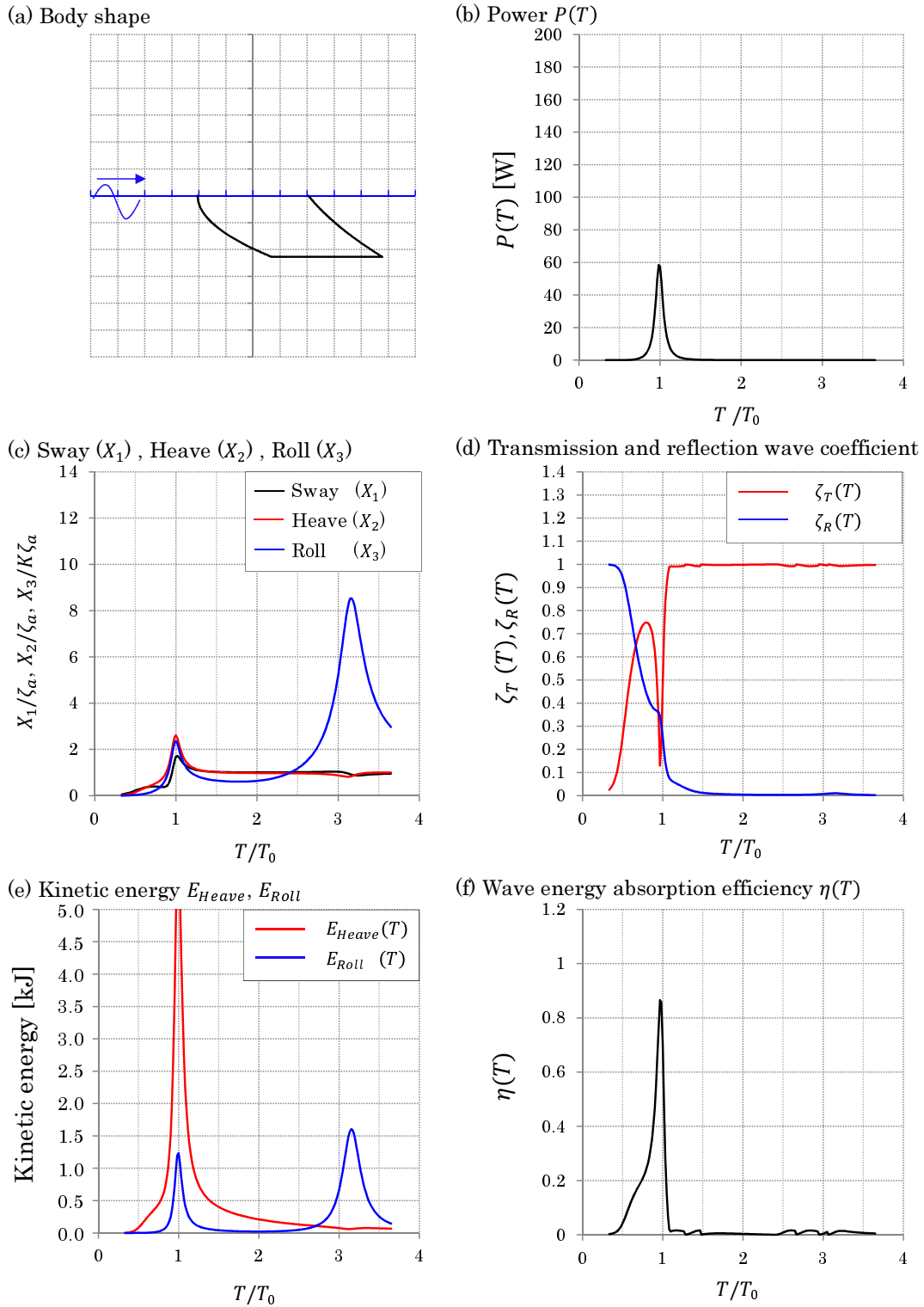


Fig. 3.56: Evaluation method4 - $D_1^{(10)}$ -.

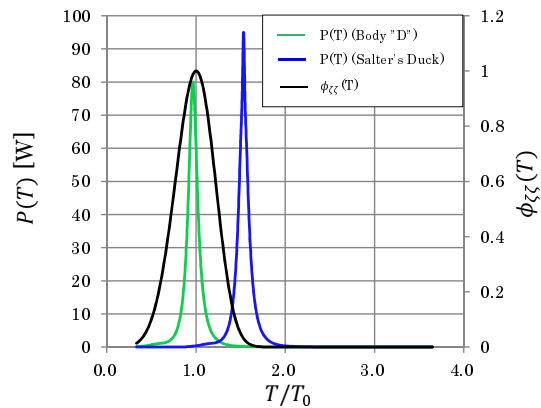
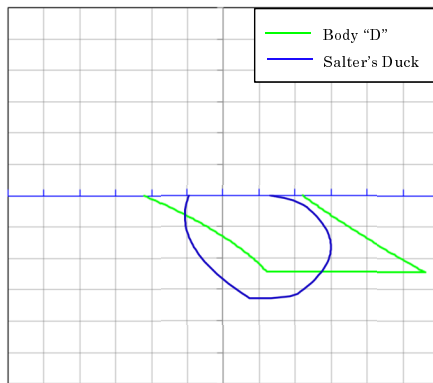
まず、Fig.3.13 より、「波エネルギー収支で評価」した結果を確認する。上位 10 形状の形状図に着目すると、いずれも水深が深くなるにつれて、波下側（紙面右側）に伸びていくような形状的特徴があるが、 $A_1^{(4)}$ 、 $A_1^{(5)}$ 、 $A_1^{(10)}$ のように水底部で波上側に突き出すような形状も見られる。Ratio of Evaluation Value をみると、 EV_1 は $A_1^{(1)}$ から $A_1^{(10)}$ まで滑らかに減少しておる。10 番目の $A_1^{(10)}$ が 0.94 であるため、評価値に関して、これらの形状に大きな差はない。また、同形状群を他の評価手法で評価した結果 EV_2 、 EV_3 、 EV_4 の傾向を確認する。 EV_2 、 EV_3 をみると、 EV_1 のような、滑らかに減少していくような傾向が見られない。つまり、「波エネルギー収支で評価」することと、「応答振幅の大きさを評価」することや「運動エネルギーで評価」することの関係性はあまり無いといえる。これは、応答振幅や運動エネルギーが大きくても、単に固有周期での揺れが大きいくだけで、浮体や発電機構がため込むエネルギーを評価することにはならないためであると考えられる。一方、 EV_4 を見てみると、 $A_1^{(1)}$ から $A_1^{(5)}$ までは、 EV_1 の傾向と同じように単調減少を示している。これは、「波エネルギー収支で評価」することが、「浮体がため込むエネルギー」と「発電機構がため込むエネルギー」の両方を評価しているためであると考えられる。

そこで今度は、Fig.3.16 より、「エネルギー吸収機構の吸収量で評価」した結果を確認する。まず、上位 10 形状の形状図に着目すると、いずれも水深が深くなるにつれて、右方向（波下側）に伸びていくような形状的特徴があり、先ほどの「波エネルギー収支で評価」した結果と合致する。Ratio of Evaluation Value をみると、 EV_4 は $D_1^{(1)}$ から $D_1^{(10)}$ まで単調に減少している。しかし、同形状群を他の評価手法で評価した結果、特に EV_2 、 EV_3 の傾向を確認すると、いずれも EV_4 の傾向と合致するものは見られない。ただし、 EV_1 は、 $A_1^{(1)}$ から $A_1^{(2)}$ の間で、若干評価値が高くなるが、それよりも下位の形状（ $A_1^{(3)}$ から $A_1^{(10)}$ ）になると、 EV_4 の傾向と同じように、減少傾向を示している。

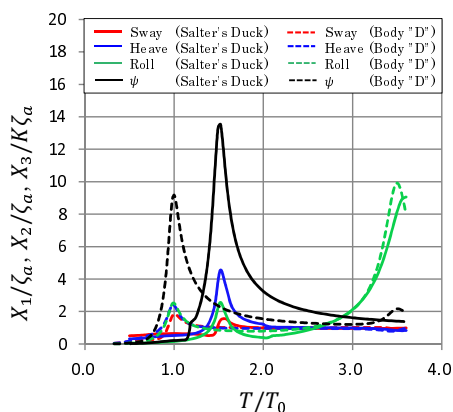
以上、「波エネルギー収支で評価」したときと、「エネルギー吸収機構の吸収量で評価」したときのそれぞれ上位 10 形状を比較したが、評価値の推移の傾向がある程度一致していることが確認できた。そのため、波力発電装置を評価するために、「波エネルギー収支で評価」することは、ある程度妥当であるといえる。

ところで、序論で紹介した Solter's Duck 形状は、現状最も波エネルギーの吸収効率が良いとされる形状であるが、対象とした評価手法では、いずれも上位に現れなかった。この原因は、不規則波スペクトルによるものと考えられる。形状 D を例として、Salter's Duck を比較した結果を Fig.3.57 に示す。Fig.3.57(b) には、両形状に設置したエネルギー吸収機構の仕事率 $P(T)$ と 3.1 節で述べた不規則波スペクトル $S(T)$ を重ねて示している。仕事率 $P(T)$ のピークを見ると、形状 D はスペクトルのピーク周期 ($T/T_0 = 1$) とほぼ一致しているのに対し、Salter's Duck は $T/T_0 = 1.5$ と離れた周期にピークがある。Fig.3.57(d) には、仕事率とスペクトルの積を示しているが、Salter's Duck はスペクトルのピークから離れた位置にピークがあるため、仕事率とスペクトルの積は非常に小さくなる。これを周期で積分したものが評価値となるため、成績上位に現れなかったのである。

(a) Body shape (Body "D" and "Salter's Duck") (b) Power ($P(T)$) and Wave spectrum ($\phi_{\zeta\zeta}(T)$)



(c) Sway(X_1), Heave(X_2), Roll(X_3), ψ



(d) multiplying the power and spectrum

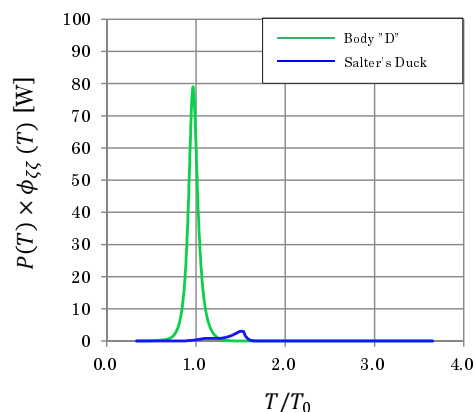


Fig. 3.57: Comparison of the body "D" and Salter's Duck.

また、波エネルギー吸収機構を搭載することを想定した場合、これの性能によって最適形状の特徴が変化することが予想される。そこで、「吸収機構のダンパーの強さが変化」した場合と「吸収機構の固有周期が変化」した場合について、最適形状と仕事率 $P(T)$ の変化を確認する。Fig.3.58 にダンパーの強さを変化させた場合 ($b_f = 0.01, 0.05, 0.10$) の結果を、Fig.3.59 にエネルギー吸収機構の固有周期を変化させた場合 ($T_{peak} = \sqrt{2}T_0, \sqrt{3}T_0$) の結果を示す。

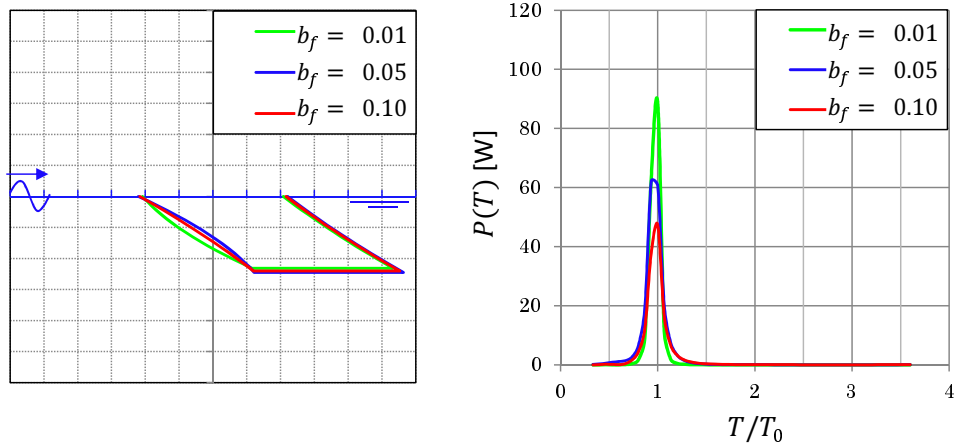


Fig. 3.58: Changes in the optimal shapes and the power in case of changing the damping coefficient.

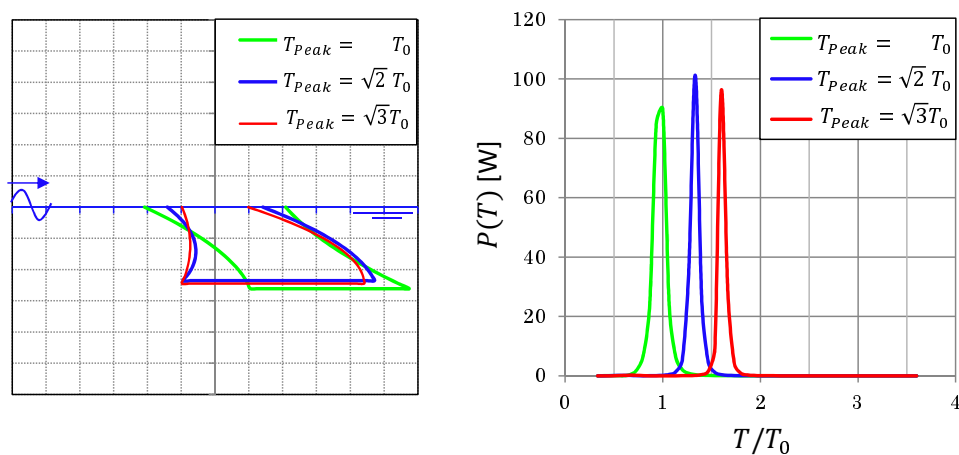


Fig. 3.59: Changes in the optimal shapes and the power in case of changing the natural period.

ダンパーの強さが変化すると、最適形状と仕事率は Fig.3.58 のような変化を示すが、仕事率の変化量に対して、形状的变化は比較的小さい。ここには示していないが、 $b_f = 0.01$ 以下とした場合では $b_f = 0.01$ の形状と、 $b_f = 0.10$ 以上とした場合では $b_f = 0.10$ の形状と同一のものが得られ、形状的变化が無くなることを確認している。

一方、固有周期が変化した場合では、Fig.3.59 のような比較的大きい変化を示した。固有周期の変化によって水線長が変わり、今回のように没水体積一定の下では、これが形状全体に影響したのである。これらの結果から、波エネルギー吸収機構を搭載する場合、最適形状を設計する上でダンパーの強さの影響は大きくないが、固有周期の変化は比較的影響が大きいといえる。

以下に、本章でのまとめを述べる。本研究では、波力発電装置の評価手法について、現状代替的に用いられる評価手法の妥当性を検討することを目的とした。現状代替的に用いられる評価手法とは、「波エネルギー収支を評価する」手法、「応答振幅の大きさで評価する」手法、「運動エネルギーの大きさで評価する」手法の3種類の手法のことを指し、理想的な評価手法である「エネルギー吸収機構の吸収する吸収量で評価する」手法と比較した。比較検討の方法は、これら4種類の評価手法において、それぞれ最も評価の高い形状を幾何学的に観察することで妥当性を検討した。その結果、以下の3点を明らかにした。

- 検討した4手法で、同一の形状となることは無く、それぞれ異なる形状が最適形状として得られた。ただし、「エネルギー吸収機構の吸収量で評価」、「波エネルギー収支で評価」、「運動エネルギーで評価」の3手法では、形状的に類似していたことから、波力発電装置に適した形状を傾向分析する場合には有効であることを示した。
- 「波エネルギー収支で評価」、「運動エネルギーで評価」、「エネルギー吸収機構の吸収量で評価」の3手法で得た最適形状 Body "A" , Body "C" および Body "D" の間を補完することで、①各手法で得た最適形状と類似するさらに評価の高い形状が存在するが、本研究における表現方法では形成できない、②各手法ごとに最適な形状が存在するのかが検討した。その結果、Body "A" , Body "C" および Body "D" の間でより評価の高い形状が無いことを確認し、②が正しいことを示した。
- それぞれの評価手法において、評価の高い上位10形状を比較することにより、「波エネルギー収支で評価する手法」は「エネルギー吸収機構の吸収する吸収量で評価する」手法の代替的な手法としてある程度妥当であることを示した。

第4章 複数浮体配置に関する検討

序論でも述べたが、浮体式波力発電装置を考える場合には、当然、単機での発電能力を高めることが重要であるが、発電量を向上させるために、複数の浮体を配置して総発電量を向上させることを考えることも重要である。複数浮体の配置を検討した研究例はいくつかあるが、それらは一般的に、Salter's Duck 形状のように単機で性能の高い形状を複数機並べて検討したものが多い。進入してくる波に対して、直角に配置する、いわゆる横列に配置する場合には、特に問題にはならないが、縦列に配置する場合には、浮体間の干渉影響やエネルギーの取得分布を考慮すると、単機で配置することに適した形状が複数機の配置に適した形状と必ずしも一致するとは限らないと予想される。

ここでは、適当な条件のもとで、複数機の配置に適した形状と単機配置に適した形状を探索し、両者を形状的観点から比較検討した結果について述べる。

本研究においては，Fig.4.1 に示すような浮体配置を想定する．

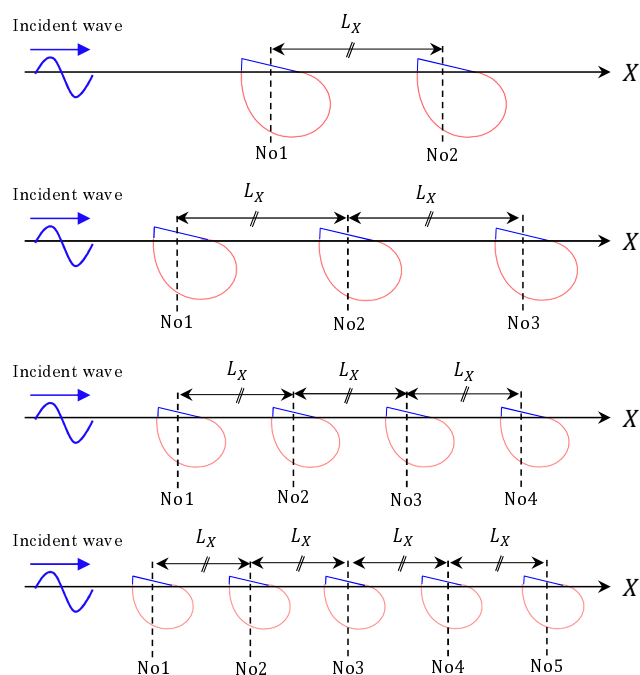


Fig. 4.1: Layout drawing of the floating bodies.

浮体群は入射してくる波に対して縦列に配置することとし，簡単のため，配置する浮体はすべて同一の形状とする．また，設置間隔に関しても，簡単のため等間隔に配置するものとする．浮体間の距離 L_X は以下の式で与える．

$$L_X = n\lambda_{T_0} \quad (4.1)$$

λ_{T_0} は波スペクトルのピーク (T_0) に相当する波長のことであり， n を変化させることで浮体間距離を調節する．また，「波エネルギー吸収量で評価」する場合は各浮体の評価値の総和とした．

4.1 複数浮体を想定した場合での評価手法

ここでは、複数浮体配置を想定した場合での比較検討に用いた評価手法について述べる。今回は以下の2手法とした。

- 1) 波エネルギー収支で評価する手法
- 2) エネルギー吸収機構の吸収量で評価する手法

なお、入射波は評価手法を検討したときと同様、実海域を想定して不規則波とする。以下に、各評価手法ごとに詳細を述べる。

1) 波エネルギー収支で評価する手法

この手法は、浮体式可動物体型波力発電装置を評価する手法として最も一般的な手法で、入射波のエネルギーから散乱波のエネルギーを引いた量のRAOを波周期に関して積分して求める手法である。Fig.4.2のように、無限遠方に浮体を取り囲む検査面を想定し、入射波 ζ_a に対して波上側の検査面から出ていく波を ζ_R 、波下側から出ていく波を ζ_T とする。

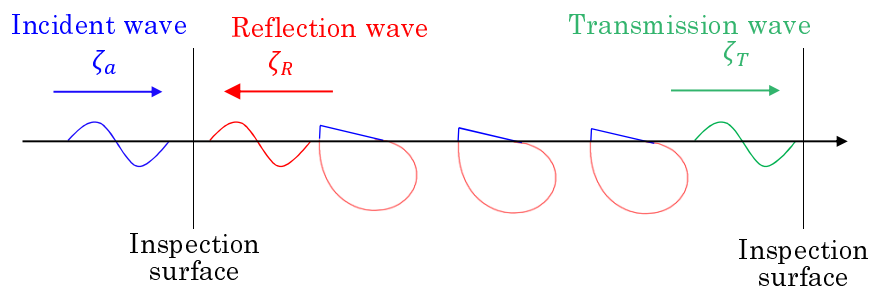


Fig. 4.2: Reflection and transmission waves by a floating bodies.

波エネルギーを吸収する機構がない場合、浮体はエネルギーを吸収しないので、(4.2)式の関係が成り立つ。

$$|\zeta_R(T)|^2 + |\zeta_T(T)|^2 = |\zeta_a|^2 \quad (4.2)$$

波エネルギー吸収機構が存在する場合にはこの関係が成り立たず、その差分が発電機構が吸収するエネルギーや浮体の運動エネルギーとなる。そのため、以下のようにエネルギー吸収効率を算定することが出来る。

$$\eta(T) = 1 - \{|\zeta_R(T)|^2 + |\zeta_T(T)|^2\} / |\zeta_a|^2 \quad (4.3)$$

本研究では，このエネルギー吸収効率 $\eta(T)$ と波スペクトル $\phi_{\zeta\zeta}(T)$ の積を波周期に関して積分した値 EV_1 (Evaluation Value 1) を用い，これが最大のものを最適形状とする．

$$EV_1 = \int_{T_a}^{T_b} \{\eta(T)\phi_{\zeta\zeta}(T)\}dT \quad (4.4)$$

2) エネルギー吸収機構の吸収量で評価する方法

この評価手法は，波浪発電装置を想定する場合において，本研究で設定した評価手法の中で最も直接的な評価手法である．

エネルギー吸収機構として様々なものが候補としてあるが，本研究では，エネルギー吸収機構の一例として Fig.4.3 のような，振子型のエネルギー吸収機構を想定する．

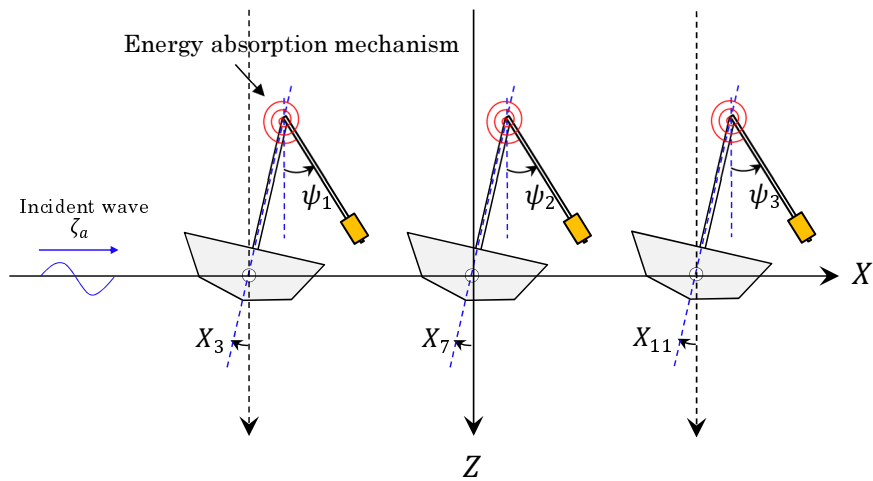


Fig. 4.3: Schematic view of the energy absorption mechanism in the case of arranging a multiple floating bodies.

Fig.4.3 中の ψ は、 Z 軸に対する振子の振れ角である。これは、浮体の運動とは別に自由度を設けて浮体運動と連成させる。すなわち、 n 番目の浮体に対しては

$$\begin{pmatrix} m_p & 0 & -m_p l_0 & m_p r_0 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{X}_{(3n-2)} \\ \ddot{X}_{(3n-1)} \\ \ddot{X}_{(3n)} \\ \dot{\psi}_n \end{bmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & -m_p g \\ 0 & C_{(3n-1),2} & C_{(3n-1),3} & 0 \\ 0 & C_{(3n),2} & C_{3n,3} - m_p l_0 g & -m_p l_0 g \\ 0 & 0 & 0 & -m_p g \end{pmatrix} \begin{bmatrix} X_{(3n-2)} \\ X_{(3n-1)} \\ X_{(3n)} \\ \psi_n \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (4.5)$$

である。ただし、式中の m_p , l_0 , r_0 は振子の質量、座標原点からの支柱高さ、振子の腕の長さを示している。また、ダンピング係数を B_f 、波周期を $T[\text{sec}]$ とすると、仕事率 $P(T)$ は以下のように算出できる。

$$P_n(T) = \frac{1}{T} \int_0^T B_f \left[\frac{d}{dt} \{X_{3n}(t) + \psi_n(t)\} \right]^2 dt \quad (4.6)$$

ただし、ダンピング係数 B_f はクリティカルダンピングの定義に従って以下のように与え、 b_f でダンパーの強さを調節する。 C_{44} は振子の復原力係数である。

$$B_f = 2b_f \sqrt{m_p C_{44}} \quad (4.7)$$

仕事率 $P(T)$ と波スペクトル $\phi_{\zeta\zeta}(T)$ の積を周期に関して積分した値を評価値 EV_4 (Evaluation Value 4) とし、 n 機の浮体の和が最大のものを最適形状とする。

$$EV_4 = \sum_{k=1}^n \left[\int_{T_a}^{T_b} \{P_k(T) \phi_{\zeta\zeta}(T)\} dT \right] \quad (4.8)$$

以上，複数の浮体を配置する場合での検討には，上記した2種類の方法によって形状評価する。ただし，エネルギー吸収機構は浮体運動と連成するため，評価方法によってエネルギー吸収機構の有無を変更することは公平な評価とはいえない。そのため，波エネルギー収支による評価手法においてもエネルギー吸収機構の搭載を想定して計算するものとする。

4.2 複数浮体配置による最適形状の変化

Table 4.1 に複数浮体配置を想定した検討に必要な諸パラメータを示す．基本的には，評価手法を検討したときと同様で，没水部の断面積 S が一定となるように調節して形状比較を行った． \overline{GM} と慣動半径 κ も没水部の断面積 S の平方根との比で与えた．これらは前記した水槽実験で用いた浮体を参考にして設定した．

Table 4.1: Calculation conditions to consider the arranging a plurality of floating body.

Parameters related to floating body	Value
Number of the floating body	1, 2, 3, 4, 5
S [m^2]	1
\overline{GM}/\sqrt{S}	0.22
κ/\sqrt{S}	1.58
Mesh number	100, 200, 300, 400, 500
Parameters related to evaluation	Value
m_p/M [%] (m_p :mass of the pendulum, M :mass of the floating body mass)	3.0
l_0/\sqrt{S} [%] (l_0 :The height of the pillar)	1.0
r_0/\sqrt{S} [%] (r_0 :The length of the pendulum arm)	0.5
Minimum period T_a ($= T/T_0$)	0.5
Maximum period T_b ($= T/T_0$)	3.0
Parameters related to GA	Value
Number of bodies per generation	300
Number of generation	20
Number of duplicates [%]	3.0
Number of design variables per a body	6
Crossover occurrence rate[%]	50.0
Mutation occurrence rate[%]	10.0

ここでは、複数機配置することを想定した場合における最適形状の変化について検討した結果について述べる。Fig.4.4に単機配置から5機配置することを想定した場合における最適形状の形状図をそれぞれ示す。

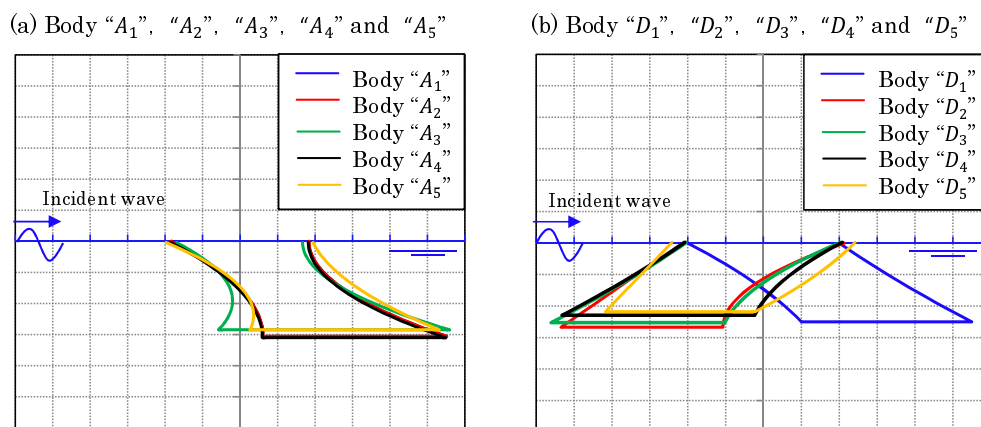


Fig. 4.4: Changes in the optimal shape in case of number of the floating body changes (1-5).

Fig.4.4 では、いずれの評価手法も機数に応じて最適形状が異なることを示していることがわかる。特に、「波エネルギー収支で評価」した場合には、Body" A₁" から Body" A₅" は配置する機数が変化しても、水深方向に対して波下側の方向（紙面右側）に向かって伸びていくような形状的特徴が共通している。なお、Body" A₁" と Body" A₂" は同一形状であった。しかし、「エネルギー吸収機構の吸収量で評価」した場合には、単機での最適形状 Body" D₁" には、Body" A₁" から" A₅" にみられる特徴を示すが、複数機での最適形状 Body" D₂" から" D₅" では反対に波上側の方向（紙面左側）に向かって伸びていくような形状的特徴がみられる。

ここで、Body" D₁" から" D₅" を例として、これらを配置する機数を1機から5機まで変化させた場合において、評価値 (EV₄) がどのように変化していくのか確認する。この結果を Fig.4.5 に示す。ここで用いた評価手法は「エネルギー吸収機構の吸収量で評価」するとした。そのため、横軸は EV₄ である。

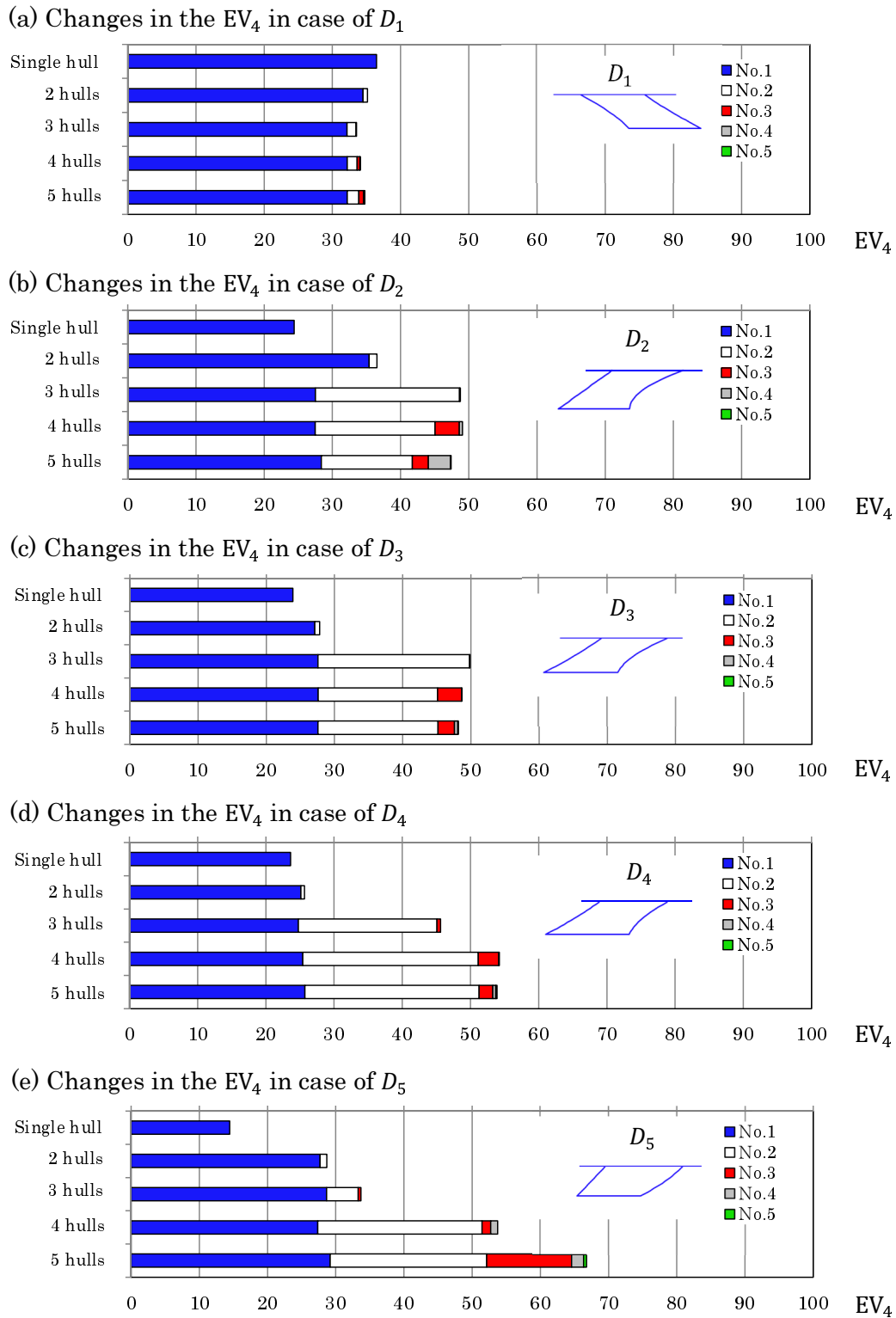


Fig. 4.5: Changes in the EV_4 in case of D_1 , D_2 , D_3 , D_4 and D_5 .

まず、Fig.4.5 より Body” D_1 ”の評価値に着目する。Body” D_1 ”は単機配置の場合において最も評価が高い形状であるが、配置する機数を2機から5機まで増やしても、評価値は増加することなく、単機配置したときの評価値 $EV_4 = 37$ から大きな変化が見られない。一方、Fig.4.5(b) から (e) の複数浮体を配置した場合に最適形状となった各形状は、いずれも単機から2機以上配置したことによって先頭浮体 (No1) の評価値が高くなる。単機配置した場合と複数機配置した場合とで何が違うのか、これを検討項目①とする。

次に、Fig.4.5(b) から (c) の Body” D_2 ”および Body” D_3 ”に着目する。Body” D_2 ”と” D_3 ”は Fig.4.4 に示すとおり、形状的にとってもよく似ており、評価値においても全体的によく似ている。ただし、配置する機数が2機になったときだけ、Body” D_2 ”は $EV_4 = 36$ であるのに対し、Body” D_3 ”では $EV_4 = 28$ と、他の機数の場合と比べると、両形状間での差が比較的大きい。その他 (1, 3, 4, 5機) の条件では、両形状間での差はあまり大きくない。なぜ、このような結果となったのか、これを検討項目②とする。

そして、5形状の中で最も評価値が高い Body” D_5 ”については、単機で配置したときには他の形状に比べて、最も評価値の低い形状であったにもかかわらず、5機配置したときには、最も評価の高い形状となる。どうしてこのようになったのか、これを検討項目③とする。

④について

単機配置した場合と複数機配置した場合で、最適形状が異なった原因について検討する。なお、複数機配置での最適形状は、Body”A₂”から Body”A₅”および Body”D₂”から Body”D₅”がよく似ていたことから、2機配置の最適形状を代表として、単機での最適形状と比較する。Fig.4.6に「波エネルギー収支で評価」した場合と「エネルギー吸収機構の吸収量で評価」した場合の単機および2機最適形状の形状図をそれぞれ示す。

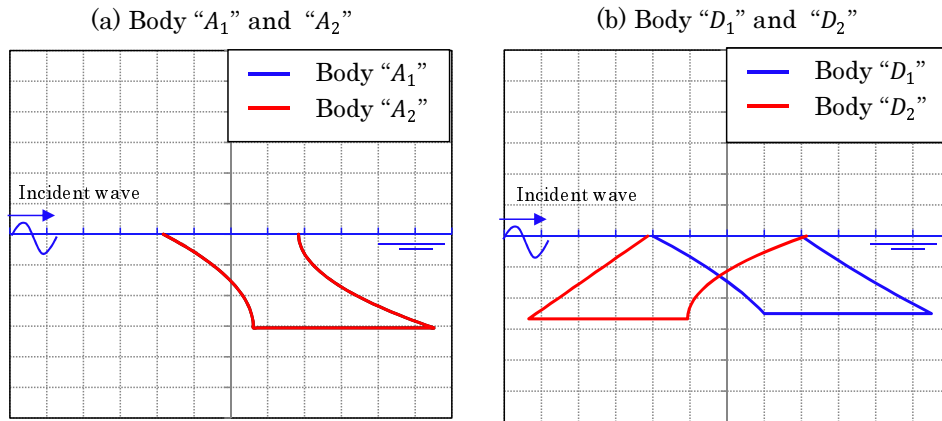
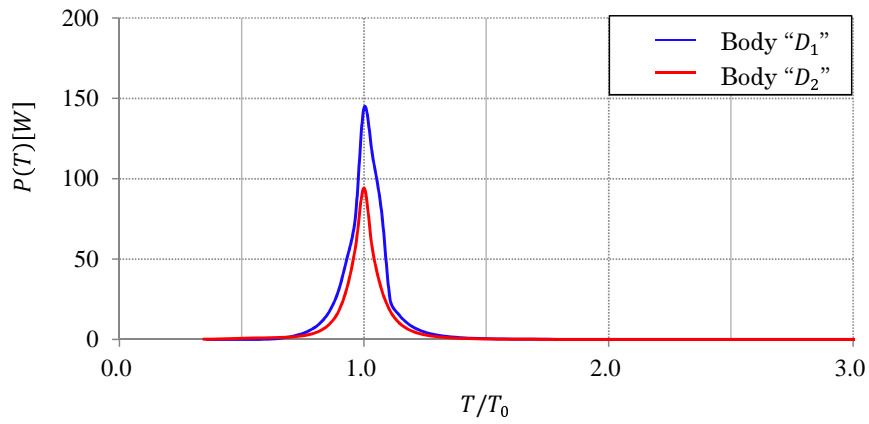


Fig. 4.6: Changes in the optimal shape in case of number of the floating body changes (1-2).

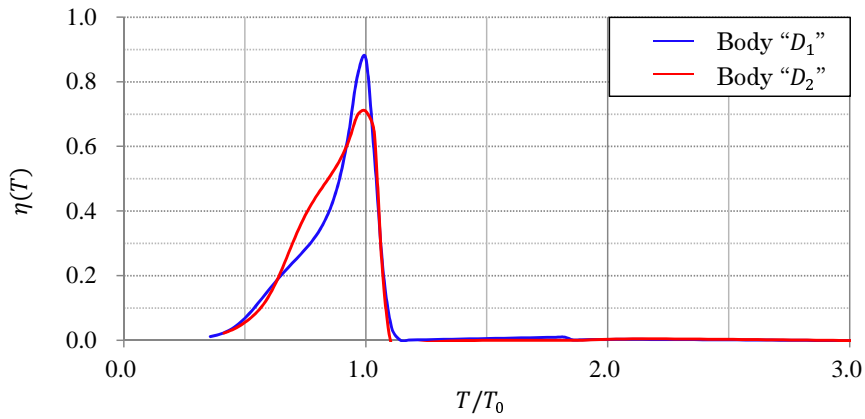
本研究で対象としている複数浮体を入射波に対して縦列に配置する場合には、透過波の大きさが重要なファクターとなる。そこで、Body”D₁”と Body”D₂”の透過波を比較する。Fig.4.7に両形状の仕事率 $P(T)$ 、波エネルギー吸収効率 $\eta(T)$ 及び透過波係数、反射波係数の関係を示す。

Fig.4.7(a), (b) をみると、両形状ともピークの周期は波スペクトルのピークとほぼ等しく $T/T_0 = 1$ 近傍にある。この周期におけるエネルギー吸収効率 $\eta(T)$ をみると、Body”D₁”は最大約 90%、D₂ は最大約 70%の波エネルギーを吸収することがわかる。また、この周期における透過波係数 ζ_T をみると、Body”D₁”は約 0.3、D₂ は約 0.5 と読み取れるので、エネルギーに換算すると、Body”D₁”は 9%、D₂ は 25%の波を透過することになる。つまり、Body”D₁”を 2 機配置したとしても、先頭機が大部分の波を吸収するため、2 番機の存在は結果にあまり影響しないのではないかと考えられる。これに対して、Body”D₂”は比較的波を透過するので、2 番機の存在が結果に影響する可能性がある。浮体間の干渉影響は浮体間距離にもよるが、今回のレギュレーションでは、結果的に Body”D₁”よりもエネルギーを吸収したため、Body”D₂”のような形状が得られたのである。

(a) Power $P(T)$ [W]



(b) Wave energy absorption efficiency $\eta(T)$



(c) Transmission and reflection waves coefficient $\zeta_T(T)$, $\zeta_R(T)$

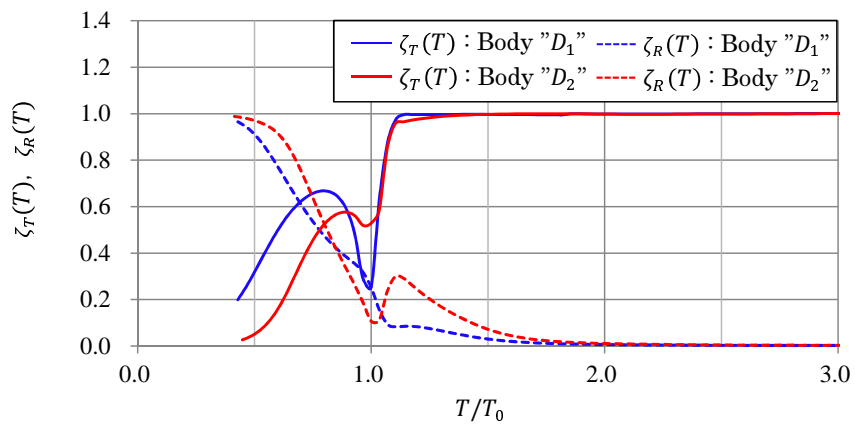


Fig. 4.7: Comparison of D_1 and D_2 .

②について

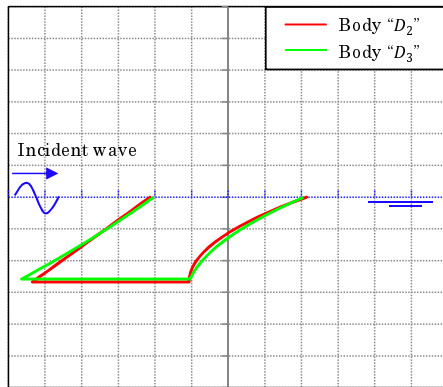
Fig.4.4 において Body” D_2 ”と Body” D_3 ”は良く似た形状であることを示したが、Fig.4.5 の中で、Body” D_2 ”と” D_3 ”をそれぞれ単機、3, 4, 5 機配置した場合には、両者の間でほぼ同程度の評価値を示しているが、2 機配置した場合には、Body” D_2 ”では $EV_4 = 37$ 、Body” D_3 ”では $EV_4 = 28$ と比較的大きく異なる結果となっている。この原因について検討するため、Body” D_2 ”と” D_3 ”をそれぞれ2 機、3 機配置したときの状態を確認する。これを Fig.4.8 と Fig.4.9 にそれぞれ示す。向かって左側に形状図、エネルギー吸収機構である振子の振れ角 (ψ)、エネルギー吸収機構の仕事率 $P(T)$ 、向かって右側に、Sway, Heave, Roll の周波数応答関数を示している。

評価値 EV_4 とは、この仕事率 $P(T)$ に不規則波スペクトル（ピークは $T/T_0 = 1$ 、Fig.3.4 参照）をかけた上で、周期に関して積分した値としている。また、本研究で与えたエネルギー吸収機構は、構造的に Sway, Heave, Roll のそれぞれが起振力となる。ただし、位相の関係もあるため、単純にこれらの運動が大きければ良いというわけにはいかない。Fig.4.8 の仕事率 $P(T)$ (No.1) をみると、エネルギー吸収機構の固有周期である $T/T_0 = 1$ にピークがあり、確かに Body” D_2 ”の方が” D_3 ”に比べて大きいことがわかる。これの直接的な要因となっているのは、振子の振れ角 (ψ) と Roll の変動速度（角速度）である。Sway (No.1), Heave (No.1), Roll (No.1) の $T/T_0 = 1$ 周辺をみると、Body” D_2 ”が” D_3 ”より大きいのは Heave で、Sway や Roll は Body” D_3 ”の方が大きい。この大小関係と、前記した位相の組み合わせにより、振子の振れ角 (ψ) が大きくなったため、結果的に Body” D_2 ”の方が” D_3 ”よりエネルギー吸収機構の仕事率 $P(T)$ が大きくなったものと考えられる。

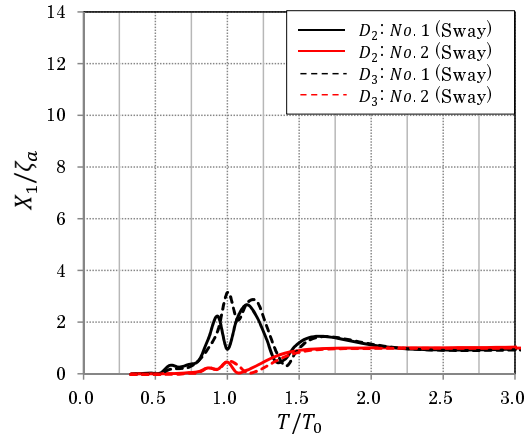
一方、Fig.4.9 の仕事率 $P(T)$ (No.1) をみると、2 機のとくと同様にエネルギー吸収機構の固有周期である $T/T_0 = 1$ にピークがあり、Body” D_2 ”と Body” D_3 ”のピークの大きさは、ほぼ同程度となっていることがわかる。 $T/T_0 = 1$ 周辺の Sway (No.1), Heave (No.1), Roll (No.1) をみると、Sway と Roll に関しては、2 機の時とほぼ同程度の振幅であるのに対し、Heave に関してのみ小さくなっている。この原因は、No.3 の浮体が存在することで、No.2 の浮体の応答振幅が大きくなり、No.1 の浮体にも影響を与えたためと考えられるが、Sway や Roll に関しても条件は同じであるため、これが直接的かつ明確な原因とはいえない。ここで述べたことは、いわゆる干渉影響であるが、このような現象が起こり得ることは十分に考えられる。

・ D_2 を2機配置した結果と D_3 を2機配置した結果の比較

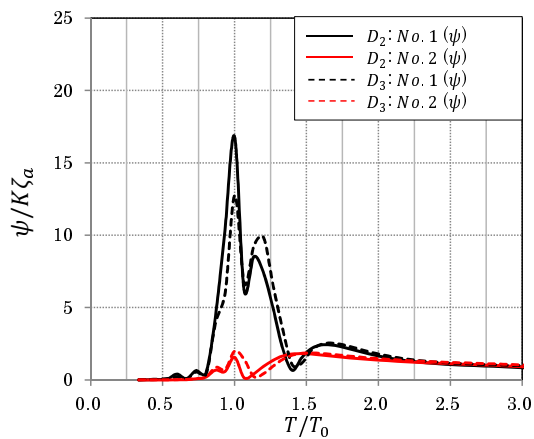
(a) Body shapes



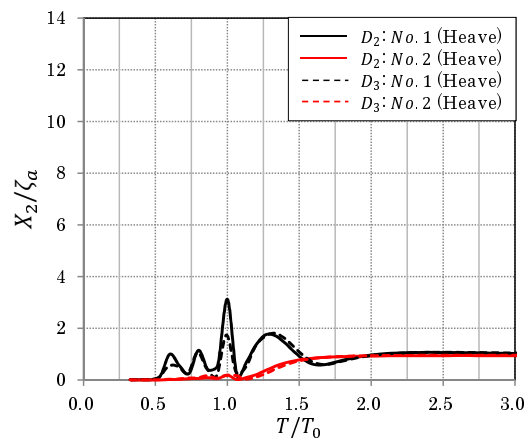
(b) Sway (X_1/ζ_a)



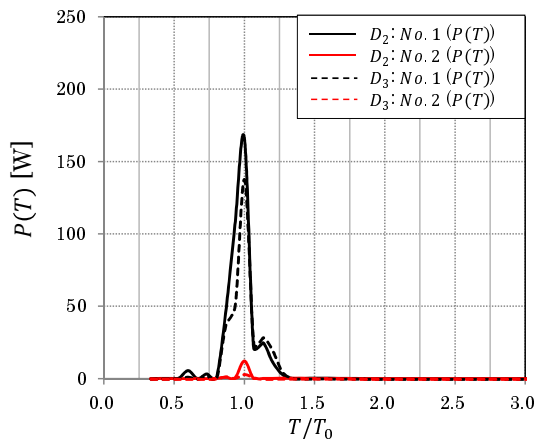
(c) $\psi/K\zeta_a$



(d) Heave (X_2/ζ_a)



(e) Power $P(T)$ [W]



(f) Roll ($X_3/K\zeta_a$)

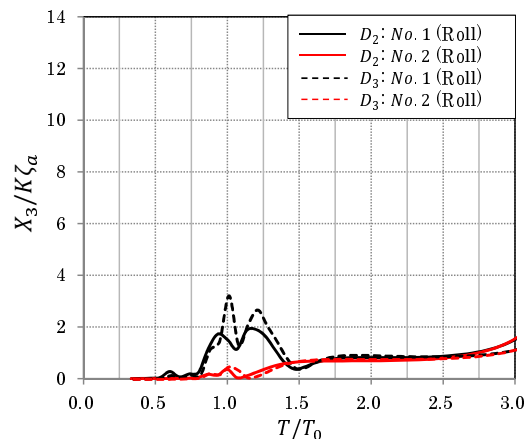


Fig. 4.8: Comparison of the case of arranging the D_2 and D_3 (each 2 hulls).

・ D_2 を3機配置した結果と D_3 を3機配置した結果の比較

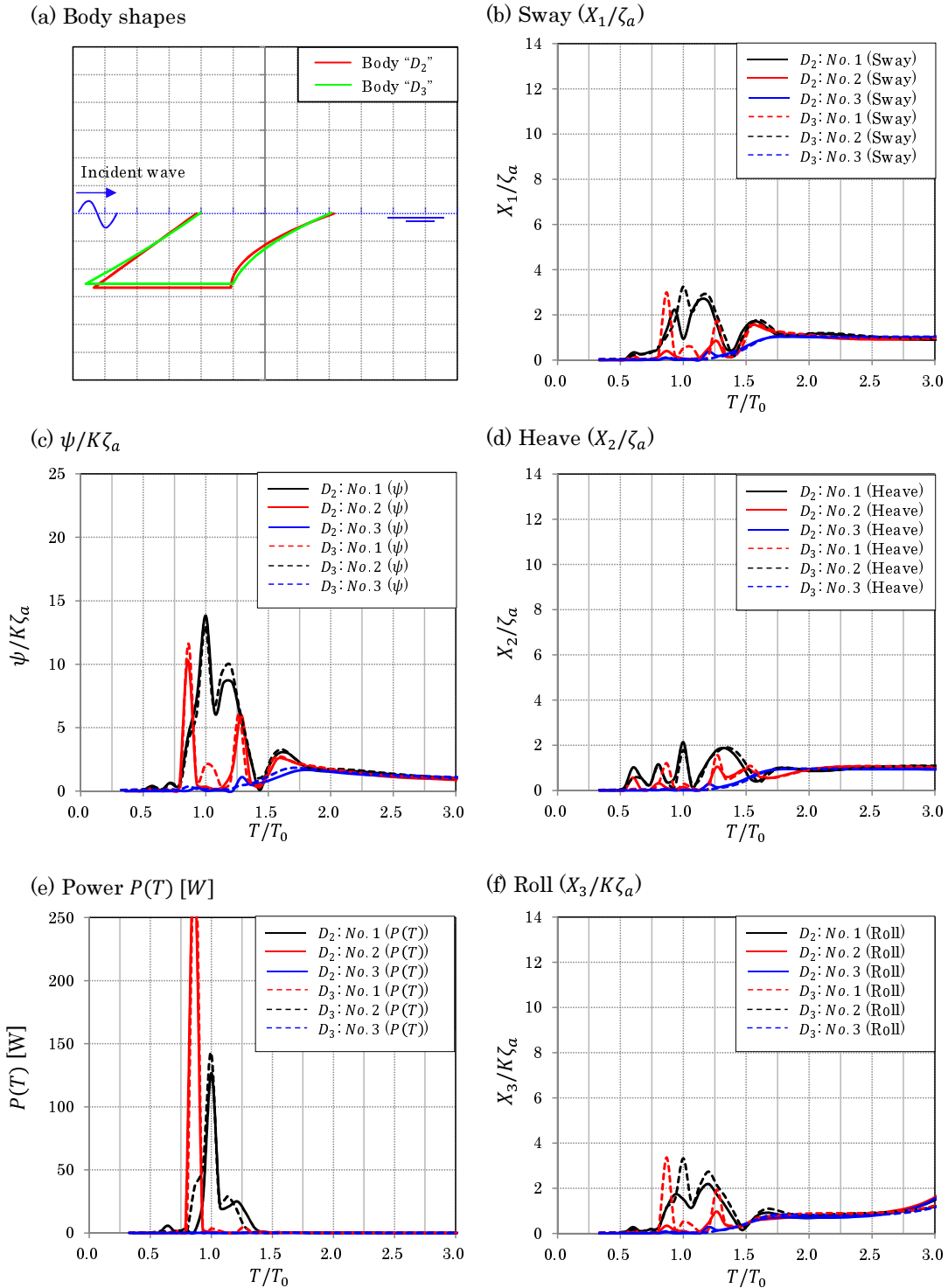


Fig. 4.9: Comparison of the case of arranging the D_2 and D_3 (each 3 hulls).

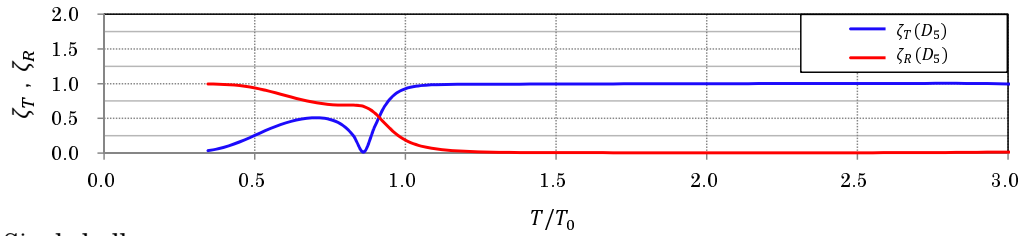
③について

Body” D_5 ”は単機では5形状の中で最も低い評価であるにも関わらず、5機配置することで最も高い評価となった原因について検討する。Fig.4.10(a)には、Body” D_5 ”の透過波係数及び反射波係数と、(b)から(f)にかけては、単機から5機まで配置したときの各浮体の仕事率 $P(T)$ を示している。

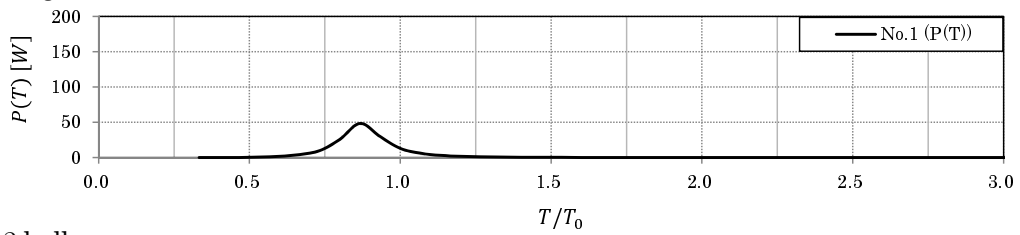
Body” D_5 ”は他の形状に比べて水線長が長く、(b)をみると、単機での仕事率のピークが、エネルギー吸収機構の固有周期 ($T/T_0 = 1$) よりも短い周期 ($T/T_0 = 0.8$) にあることがわかる。一方(a)より、この周期における透過波係数をみると、 $T/T_0 = 0.8$ における透過波係数 ζ_T は、ちょうどほぼゼロとなっており、反射する波の方が多いことがわかる。しかし、(c)から(f)に示すように、配置する機数が増えると、No.2やNo.3といった後続機のピークが、 $T/T_0 = 1$ 近傍に現れる様になる。これは、(a)の透過波係数 ζ_T をみればわかるが、 $T/T_0 = 0.8$ よりも長い周期域では、透過波係数 ζ_T が急激に大きくなり、エネルギー吸収機構の固有周期 $T/T_0 = 1$ では、波の透過率が約90%となっているため、後続機まで波が行き届くようになったことが原因であると考えられる。

Fig.4.11 から Fig.4.35 に Body” D_1 ”から” D_5 ”の5形状を、それぞれ単機から5機配置した場合の計算結果を示す。

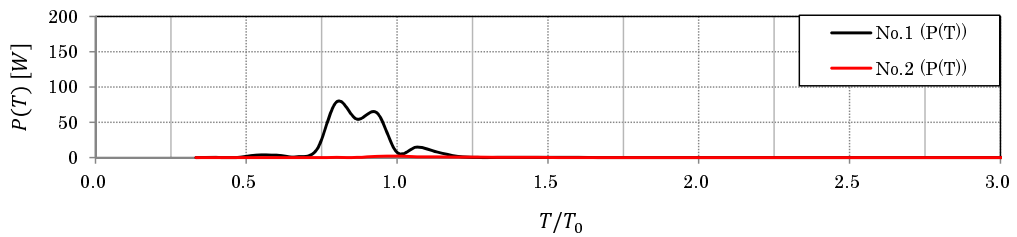
(a) Transmission and reflection waves coefficient



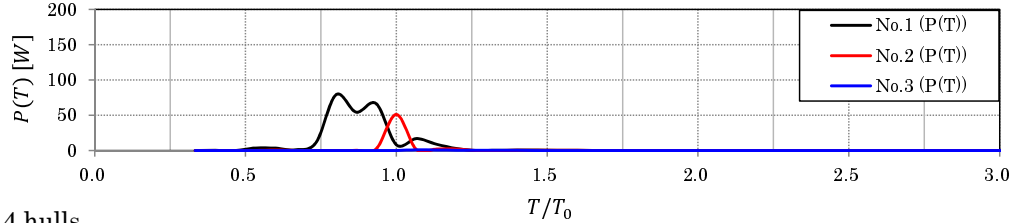
(b) Single hull



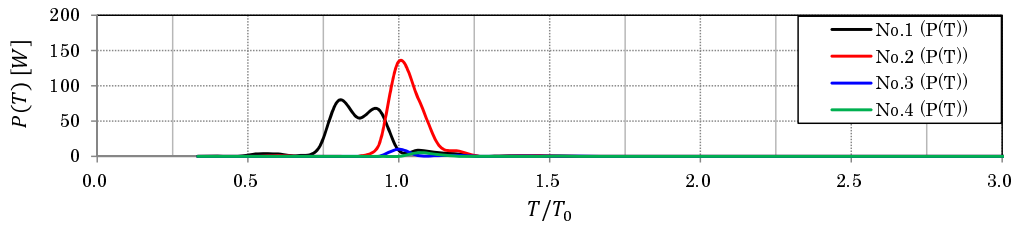
(c) 2 hulls



(d) 3 hulls



(e) 4 hulls



(f) 5 hulls

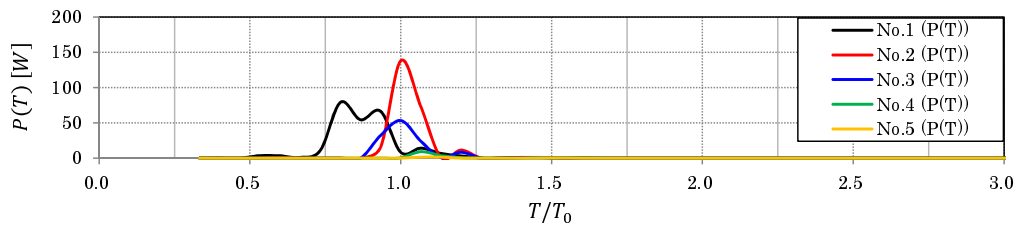


Fig. 4.10: Changes in the power in case of changing the arrangement D_5

・単機配置最適形状 D_1 : 単機配置した場合

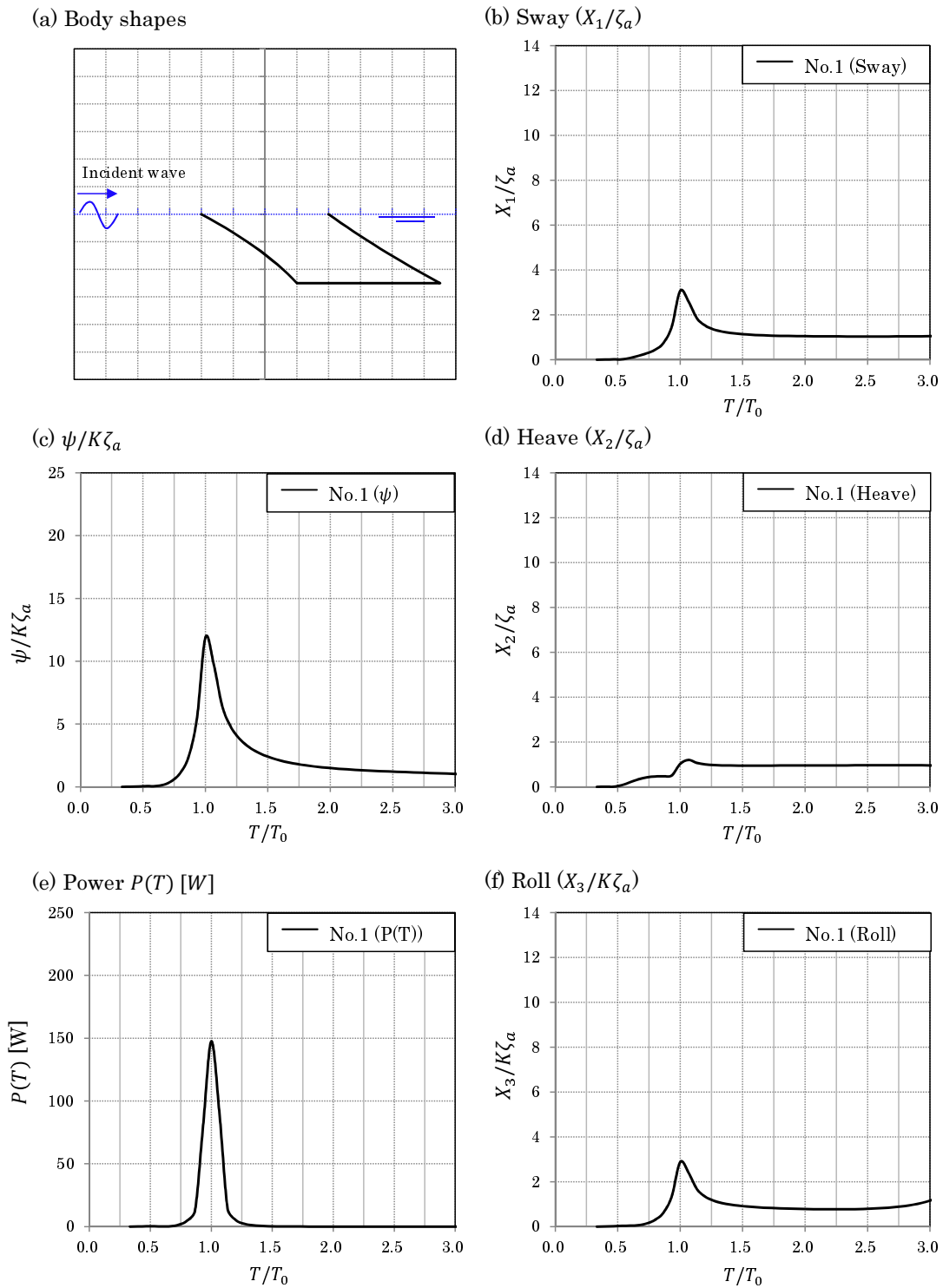


Fig. 4.11: The case of placed D_1 as a single hull.

・単機配置最適形状 D_1 : 2機配置した場合

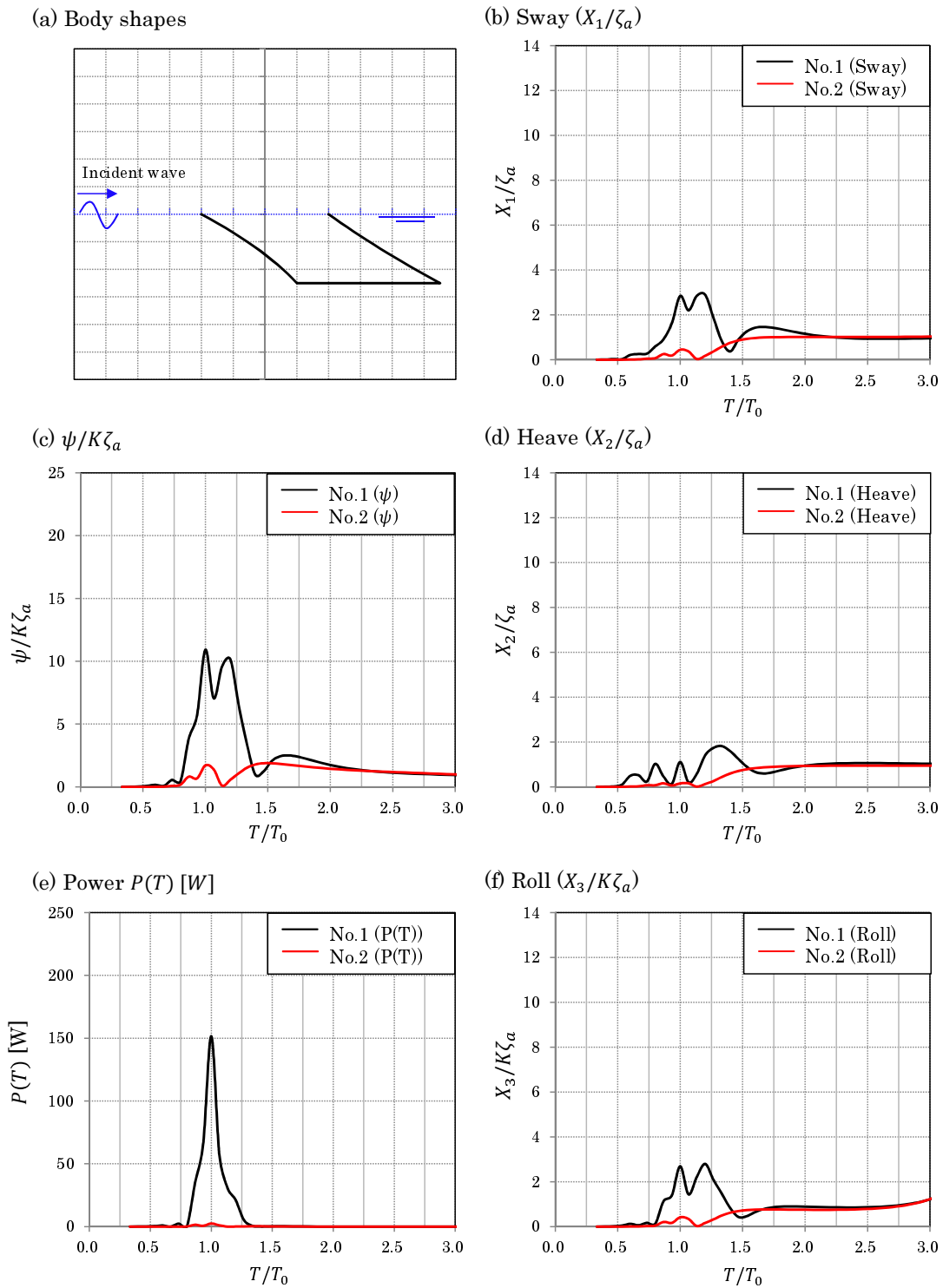


Fig. 4.12: The case of placed D_1 as 2 hulls.

・単機配置最適形状 D_1 : 3機配置した場合

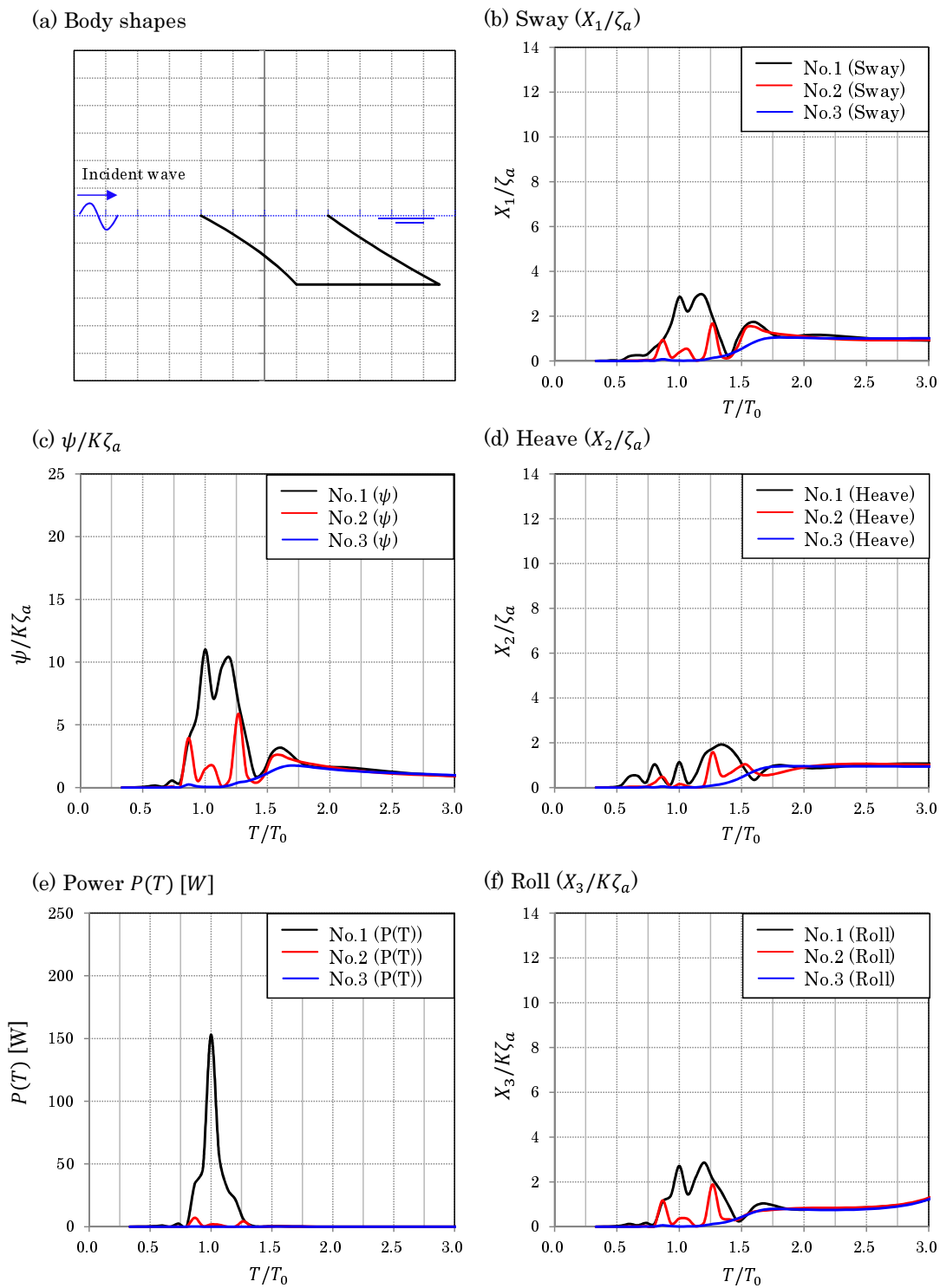


Fig. 4.13: The case of placed D_1 as 3 hulls.

・単機配置最適形状 D_1 : 4機配置した場合

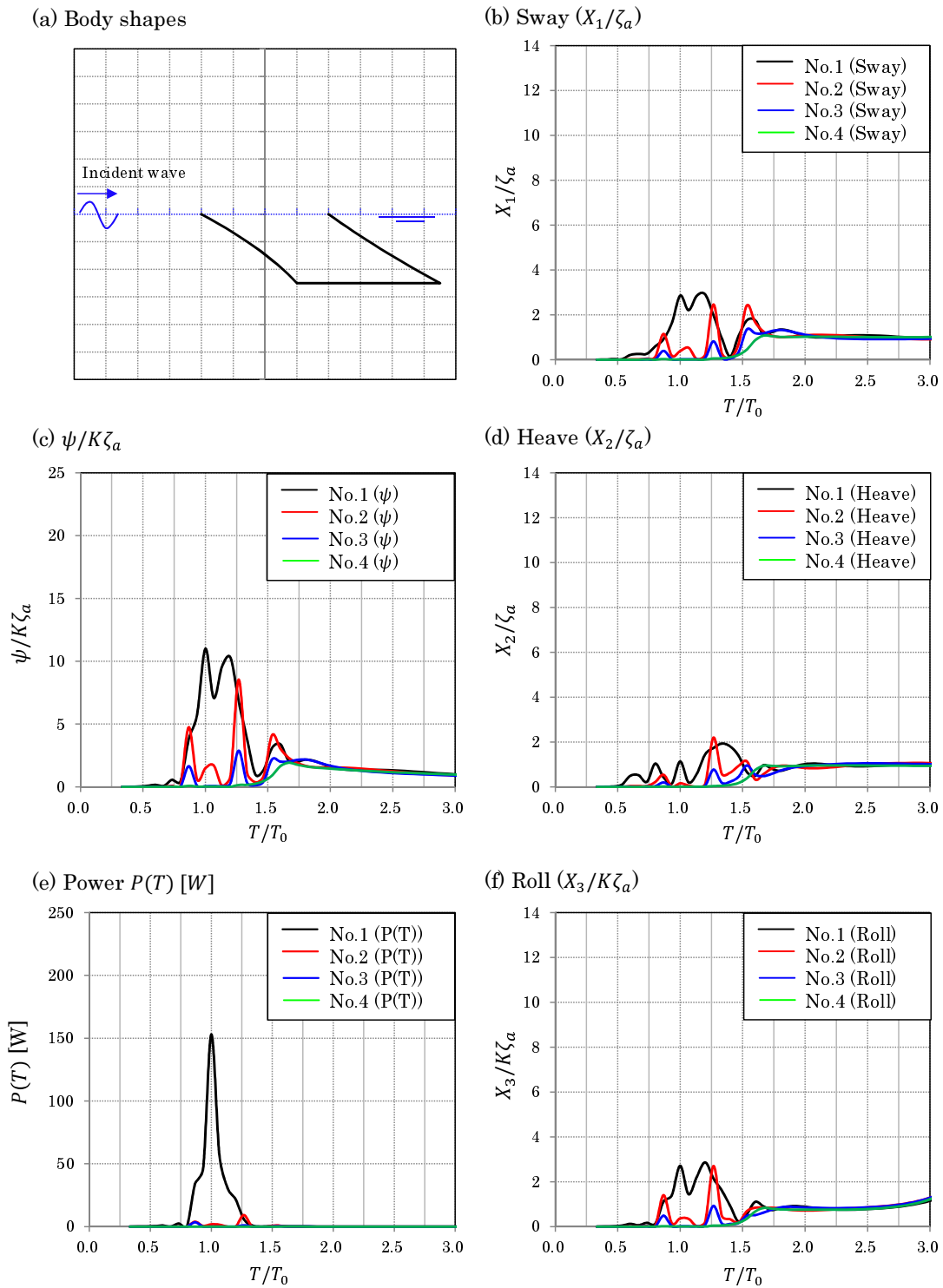


Fig. 4.14: The case of placed D_1 as 4 hulls.

・単機配置最適形状 D_1 : 5機配置した場合

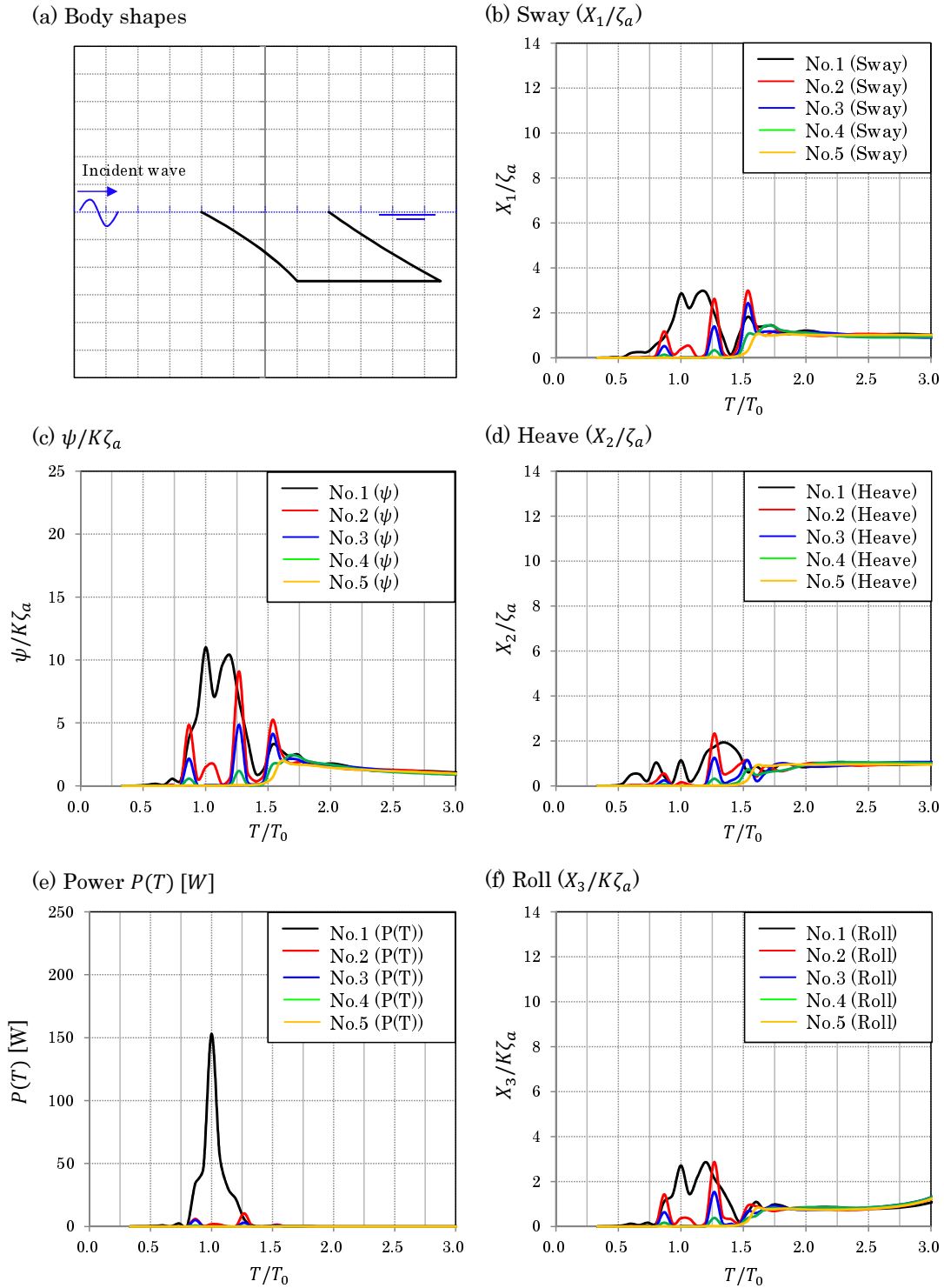
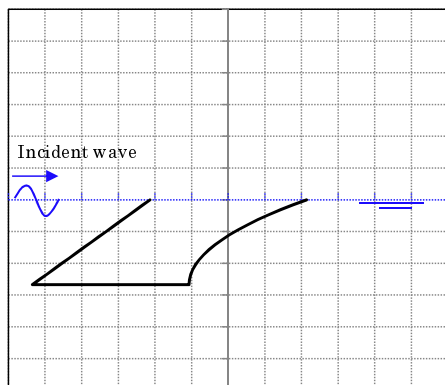


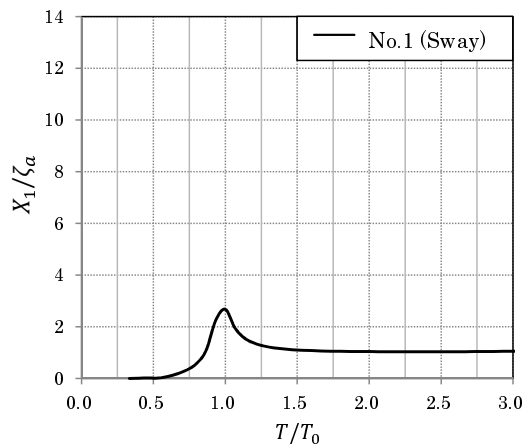
Fig. 4.15: The case of placed D_1 as 5 hulls.

・2機配置最適形状 D_2 : 単機配置した場合

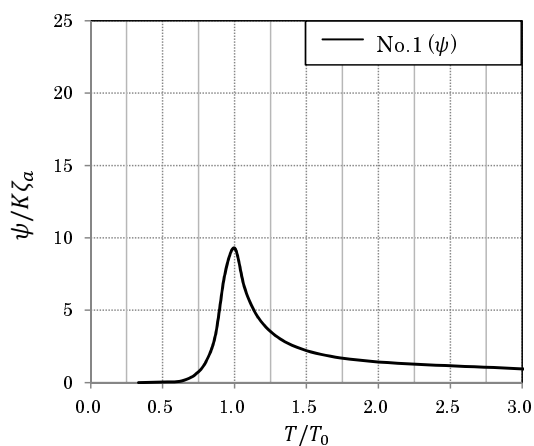
(a) Body shapes



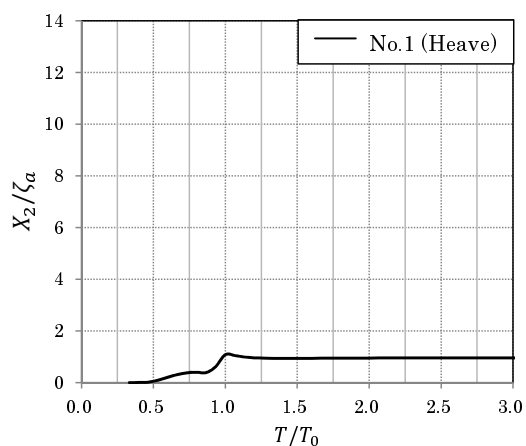
(b) Sway (X_1/ζ_a)



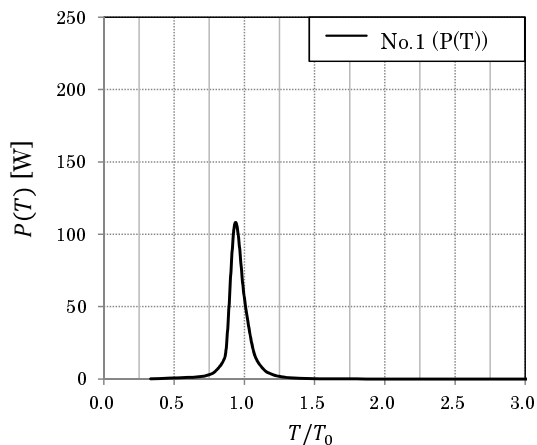
(c) $\psi/K\zeta_a$



(d) Heave (X_2/ζ_a)



(e) Power $P(T)$ [W]



(f) Roll ($X_3/K\zeta_a$)

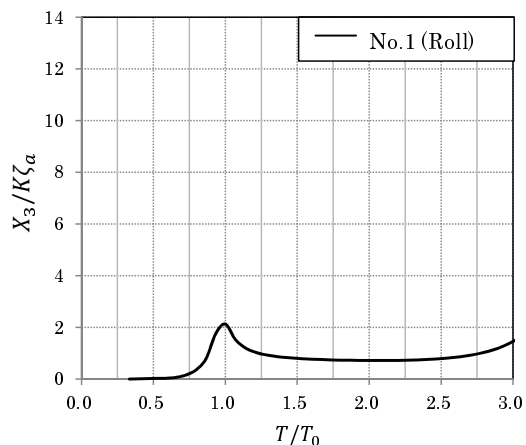


Fig. 4.16: The case of placed D_2 as a single hull.

・2機配置最適形状 D_2 : 2機配置した場合

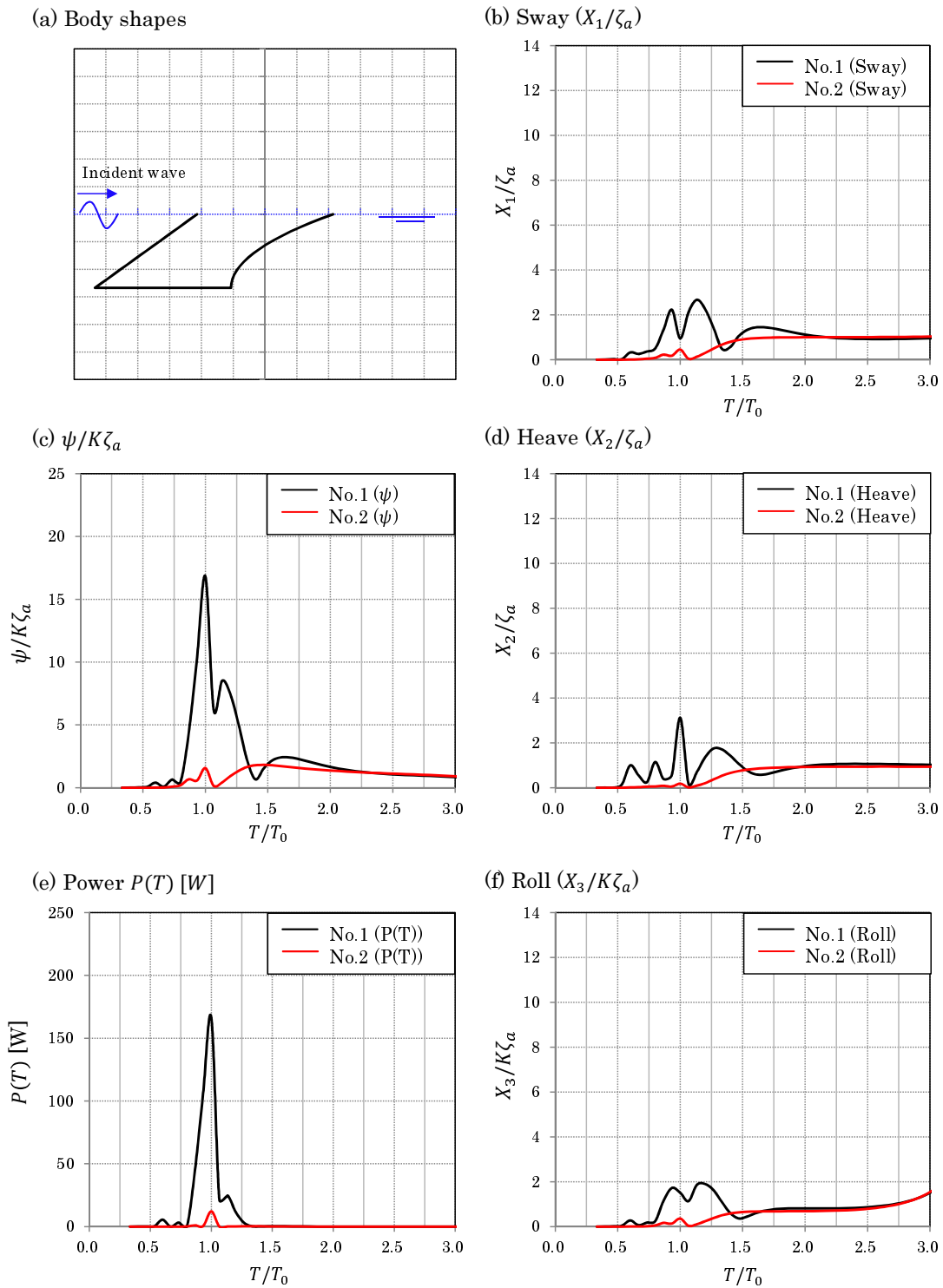


Fig. 4.17: The case of placed D_2 as 2 hulls.

・2機配置最適形状 D_2 : 3機配置した場合

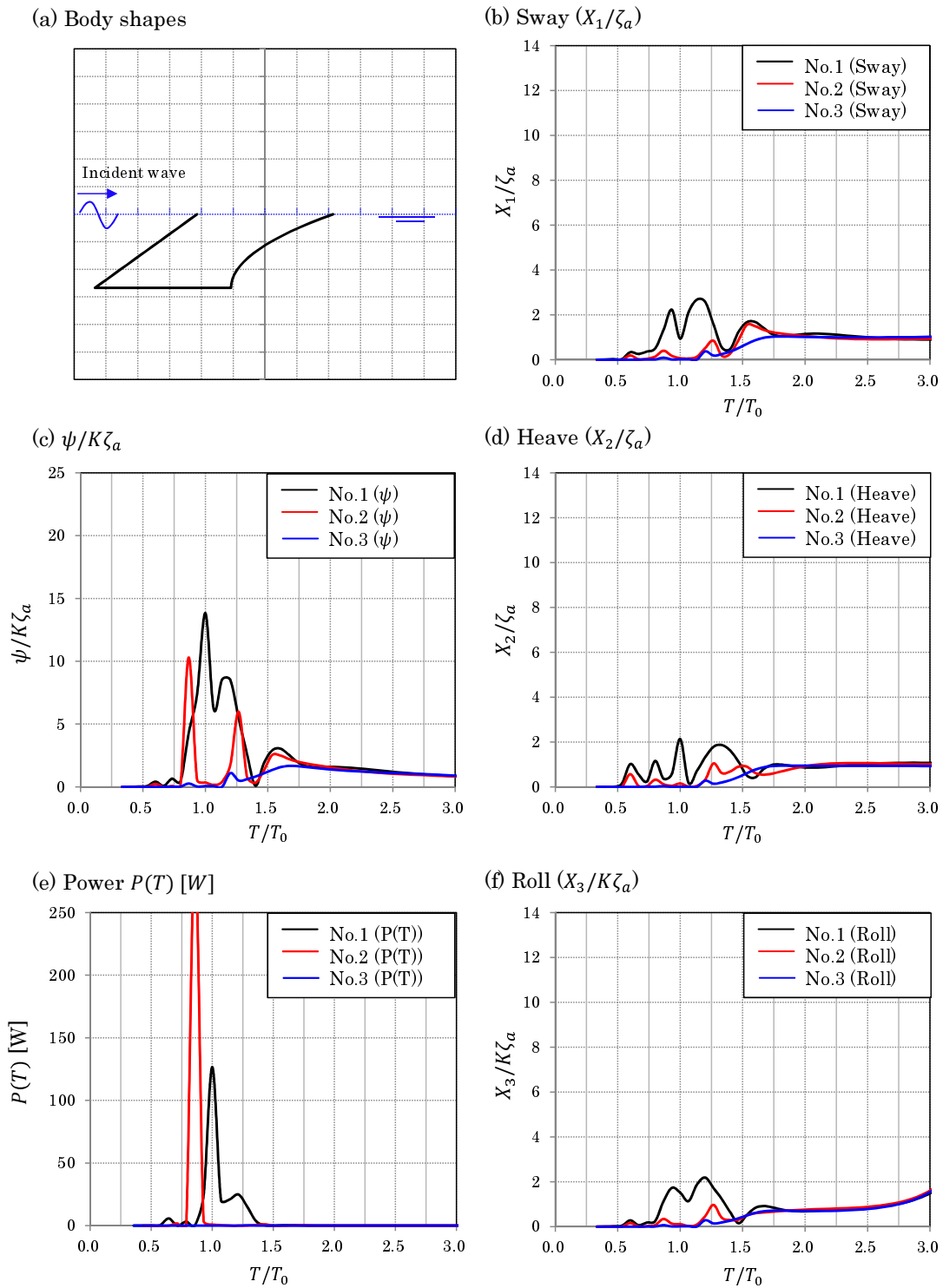
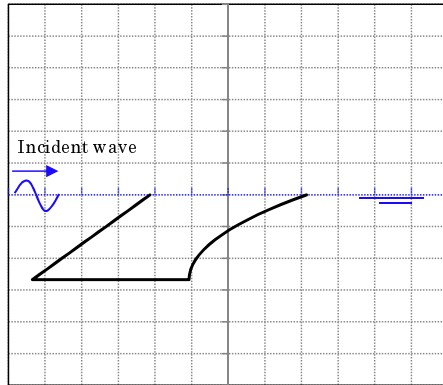


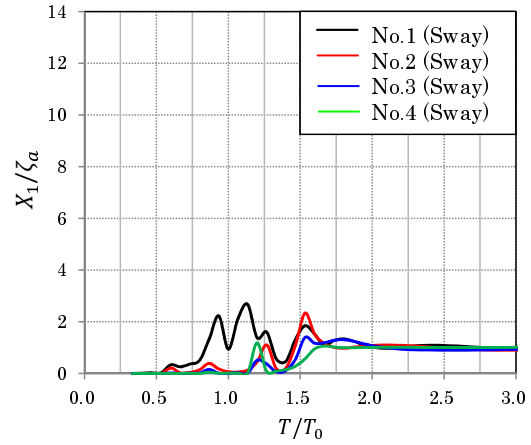
Fig. 4.18: The case of placed D_2 as 3 hulls.

・2機配置最適形状 D_2 : 4機配置した場合

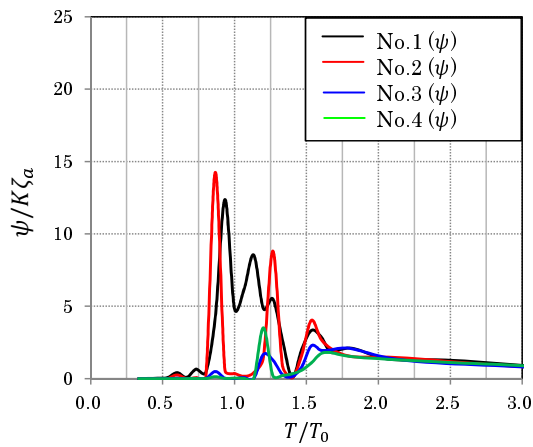
(a) Body shapes



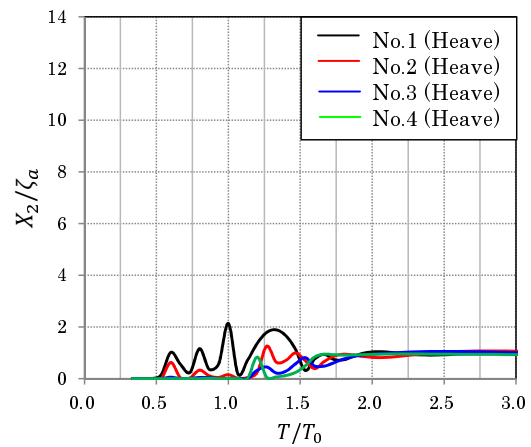
(b) Sway (X_1/ζ_a)



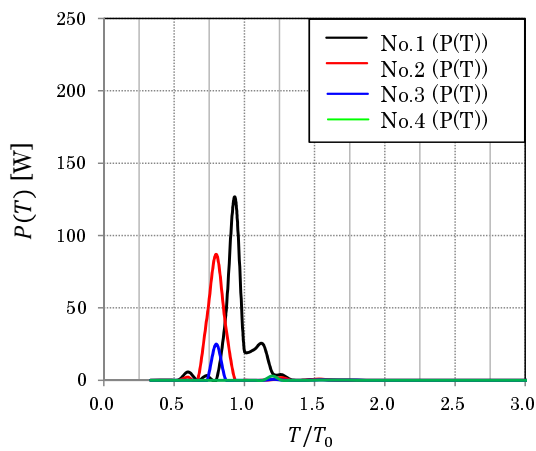
(c) $\psi/K\zeta_a$



(d) Heave (X_2/ζ_a)



(e) Power $P(T)$ [W]



(f) Roll ($X_3/K\zeta_a$)

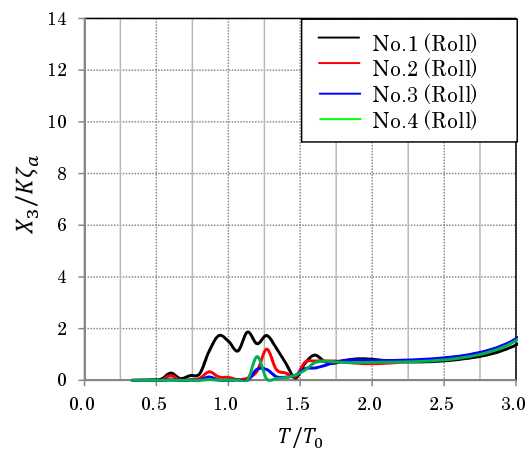


Fig. 4.19: The case of placed D_2 as 4 hulls.

・2機配置最適形状 D_2 : 5機配置した場合

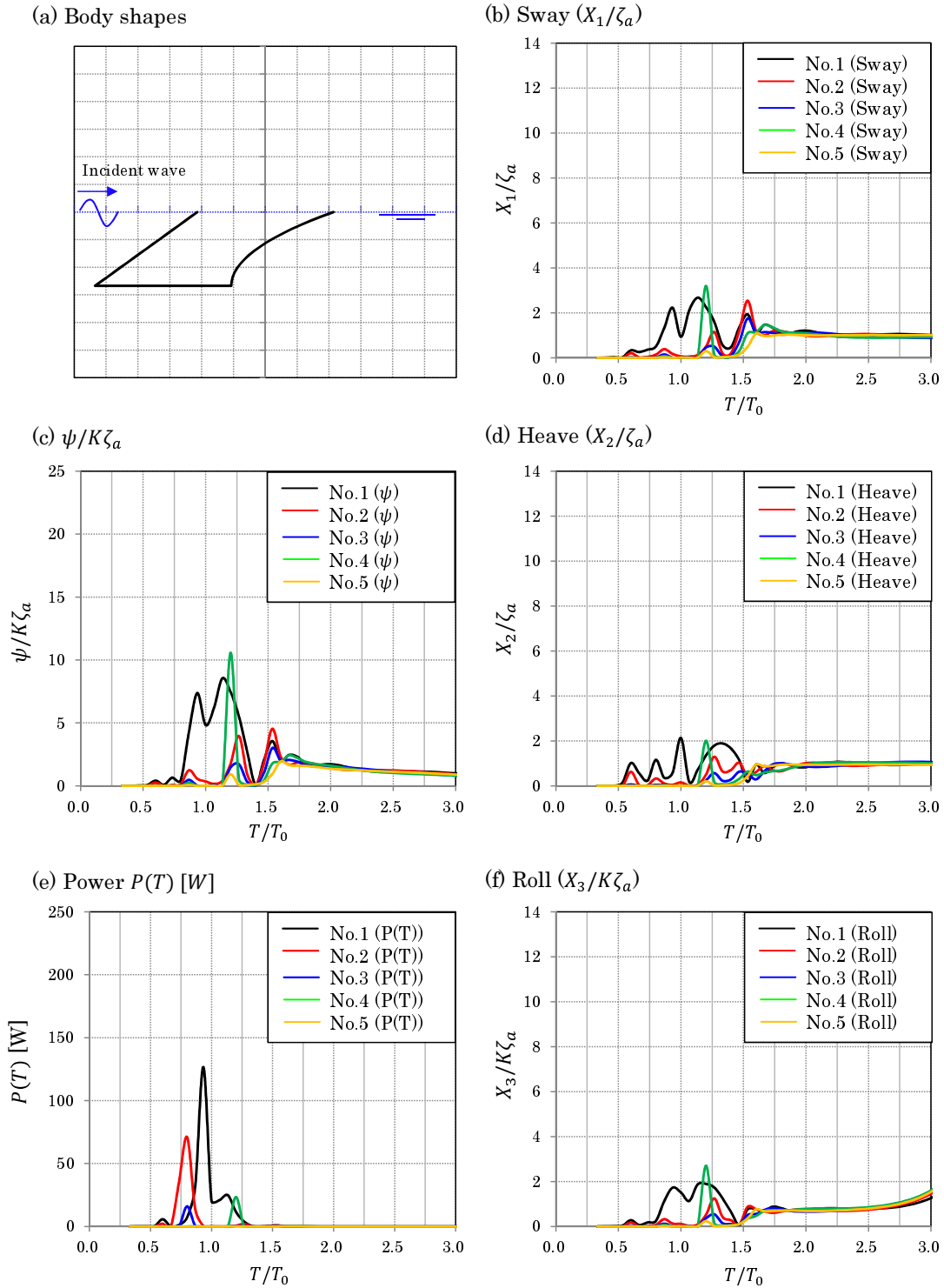


Fig. 4.20: The case of placed D_2 as 5 hulls.

・3機配置最適形状 D_3 : 単機配置した場合

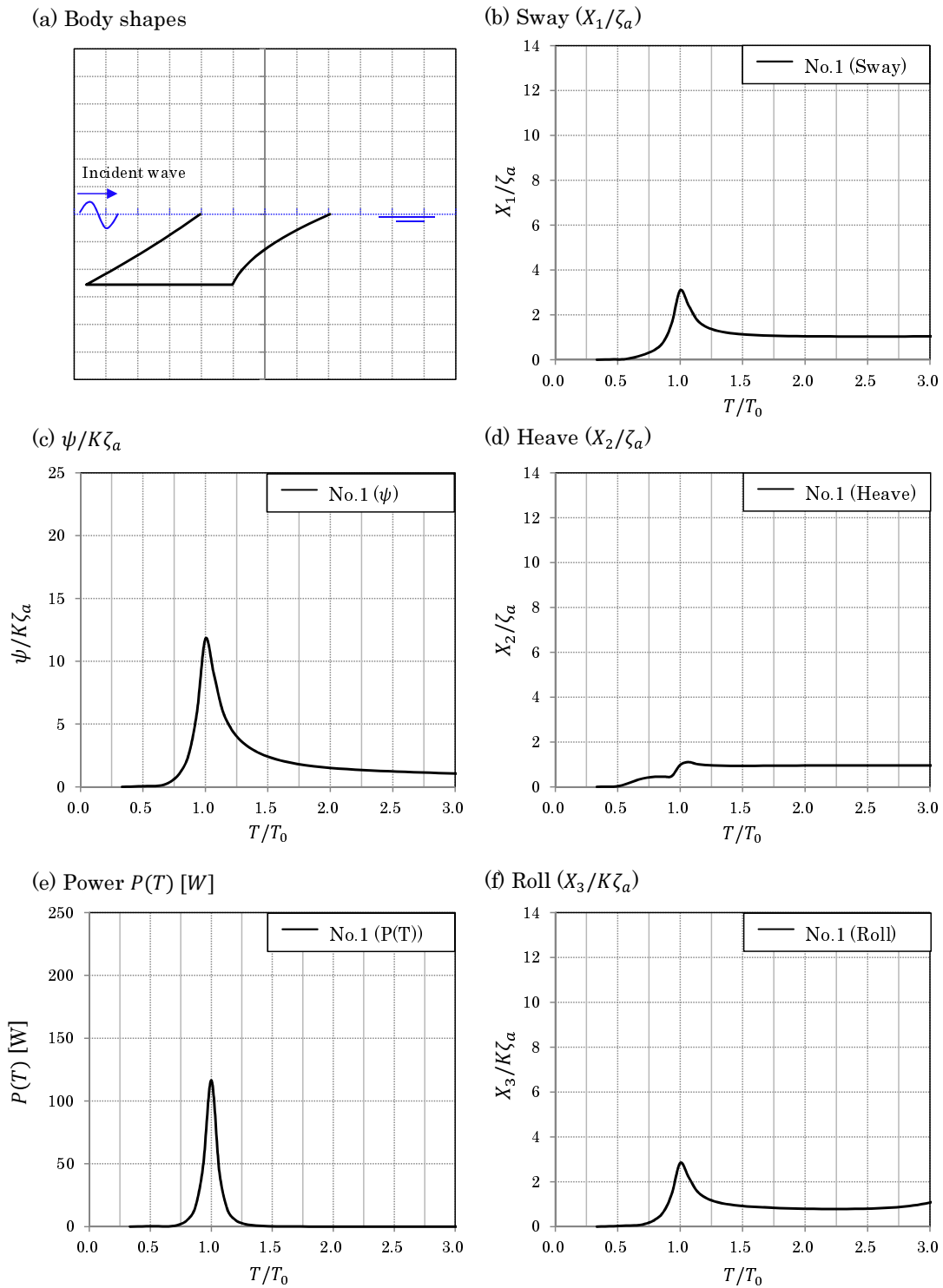


Fig. 4.21: The case of placed D_3 as a single hull.

・3機配置最適形状 D_3 : 2機配置した場合

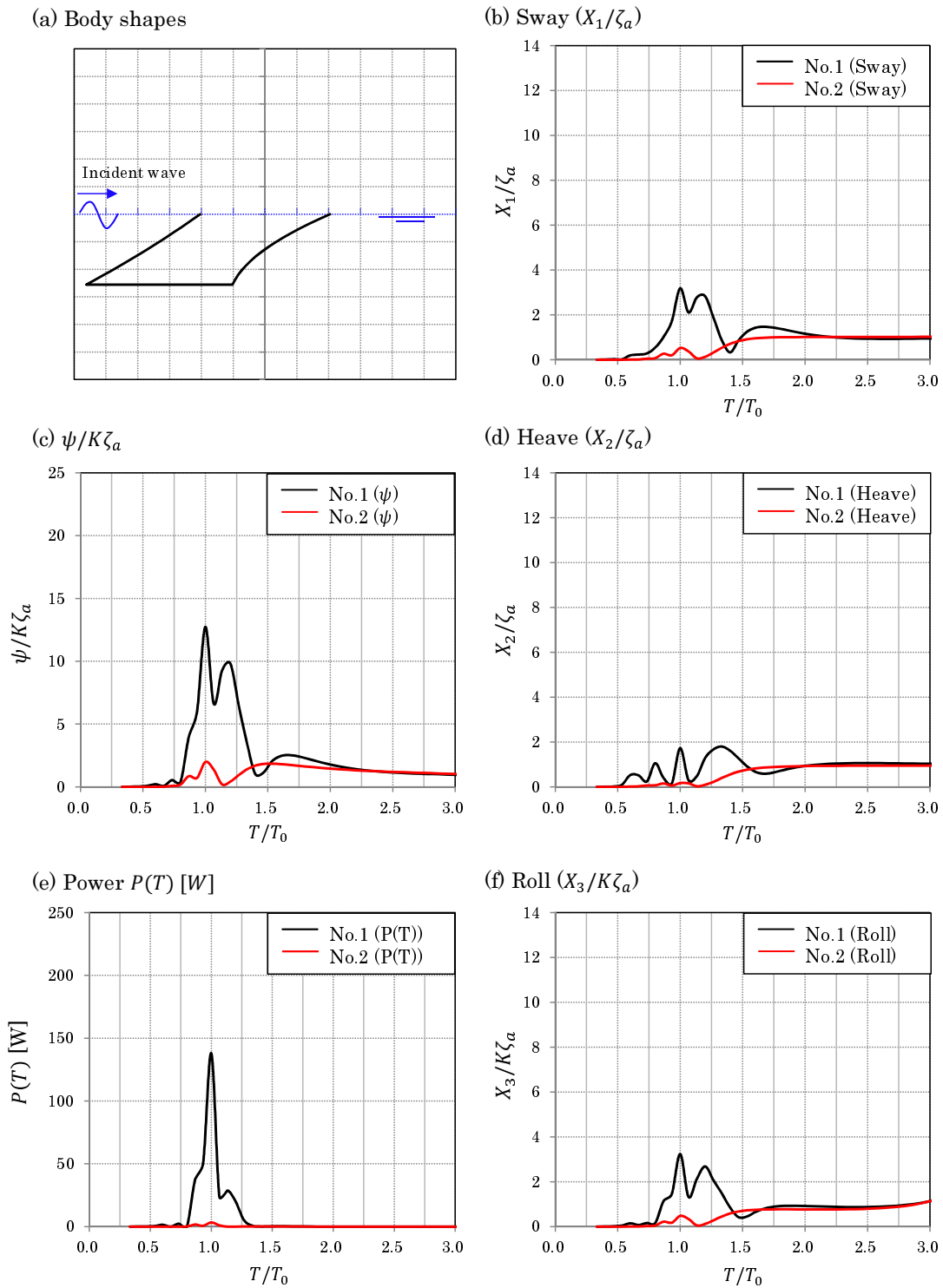
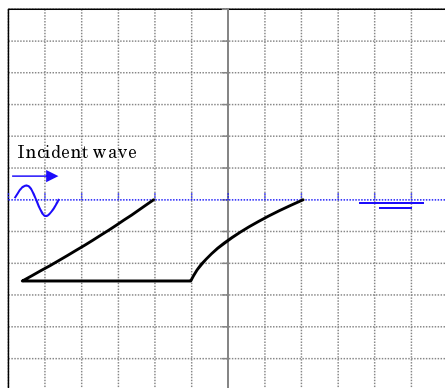


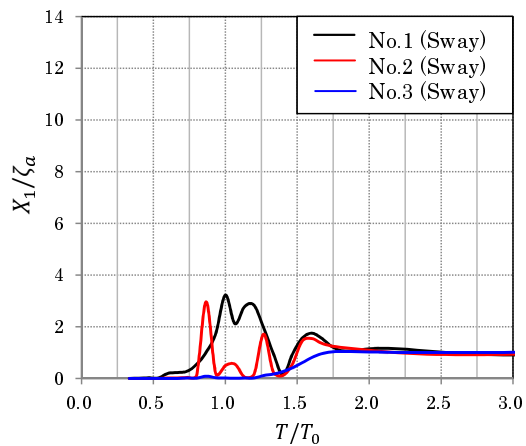
Fig. 4.22: The case of placed D_3 as 2 hulls.

・3機配置最適形状 D_3 : 3機配置した場合

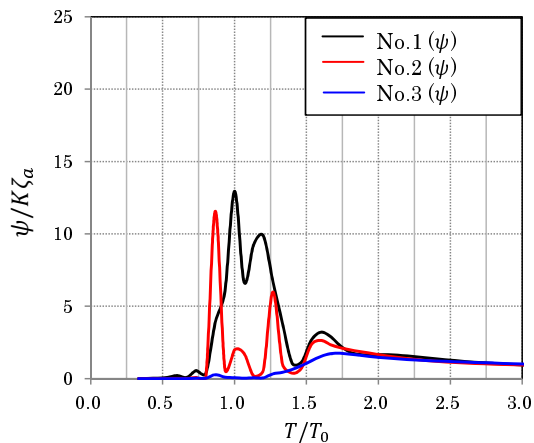
(a) Body shapes



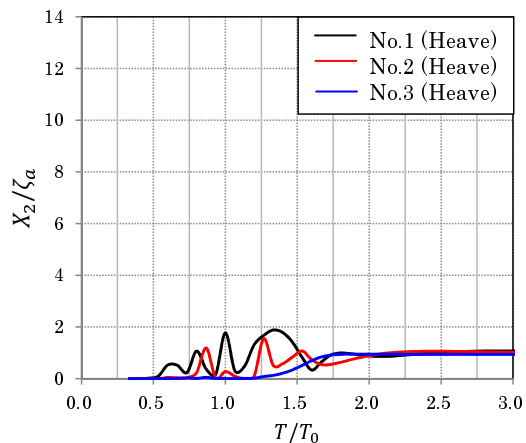
(b) Sway (X_1/ζ_a)



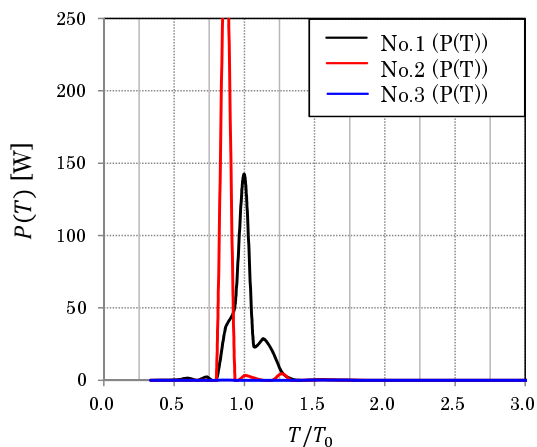
(c) $\psi/K\zeta_a$



(d) Heave (X_2/ζ_a)



(e) Power $P(T)$ [W]



(f) Roll ($X_3/K\zeta_a$)

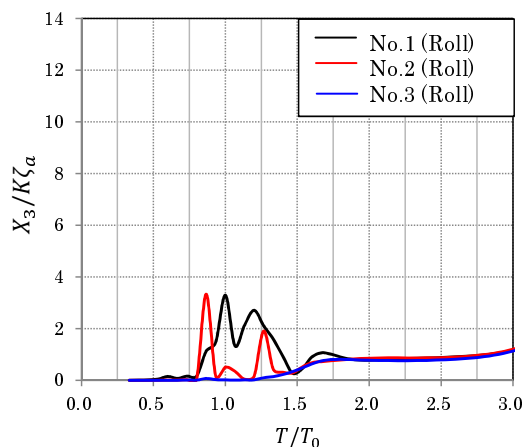


Fig. 4.23: The case of placed D_3 as 3 hulls.

・3機配置最適形状 D_3 : 4機配置した場合

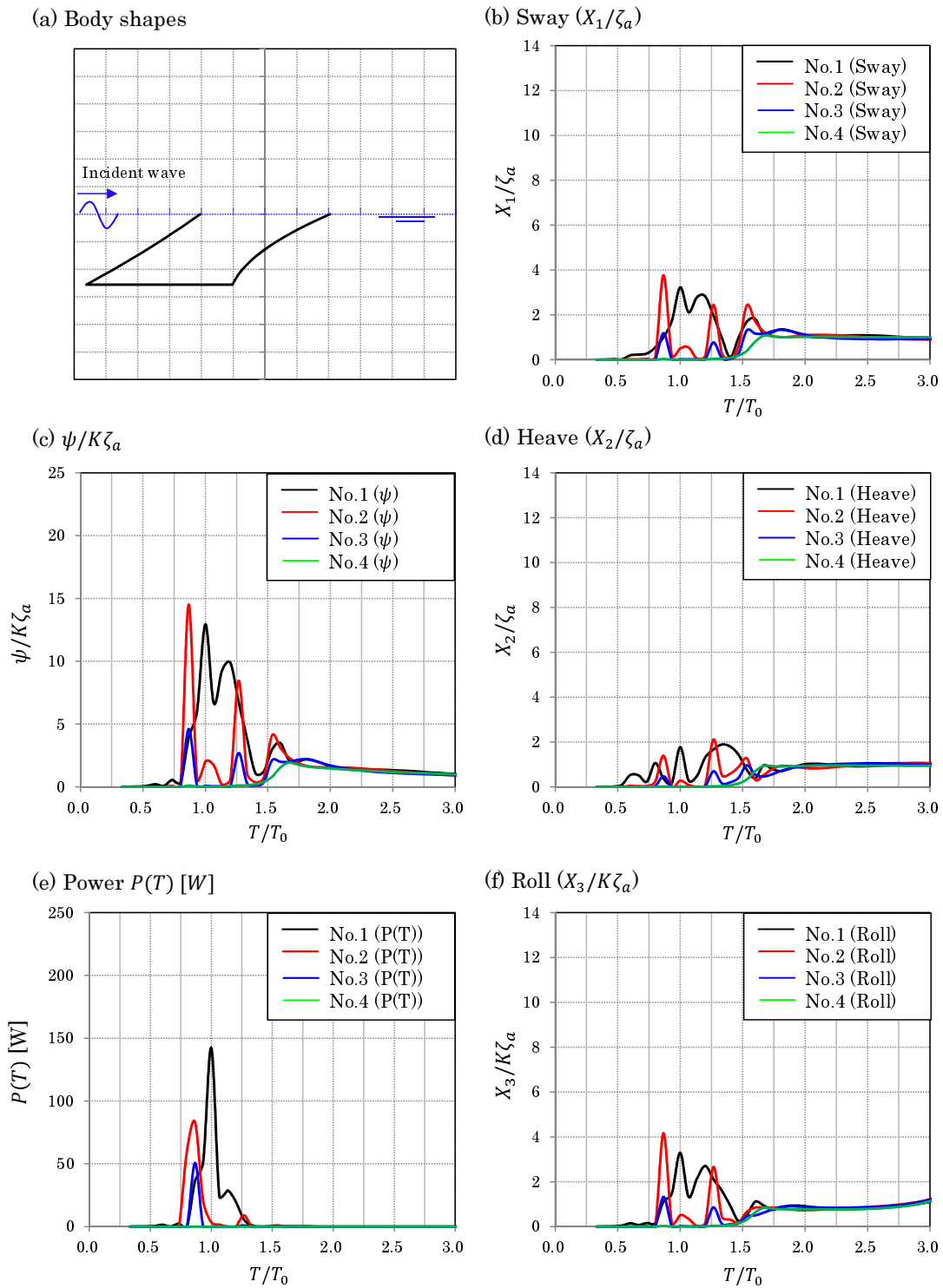


Fig. 4.24: The case of placed D_3 as 4 hulls.

・3機配置最適形状 D_3 : 5機配置した場合

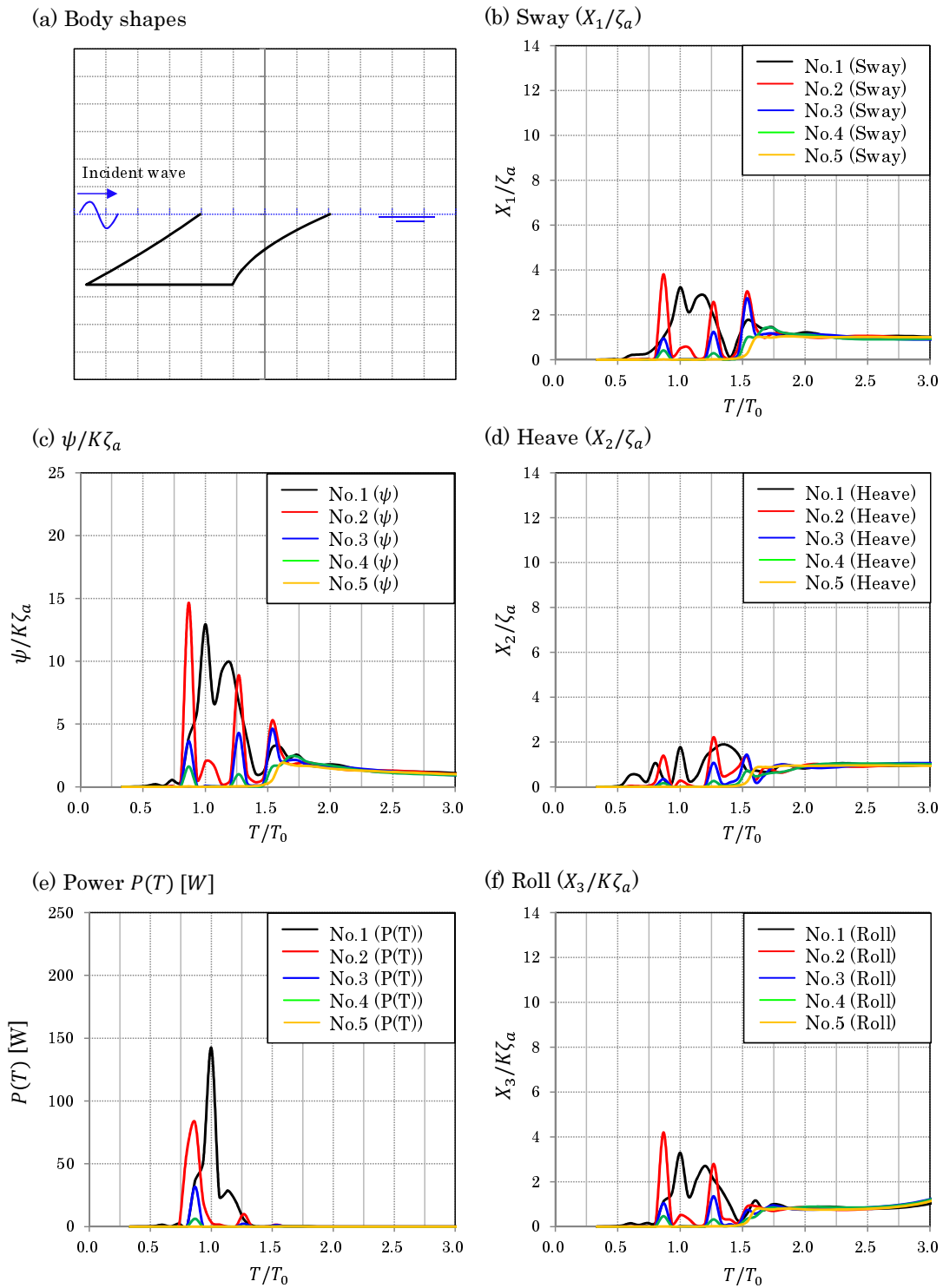


Fig. 4.25: The case of placed D_3 as 5 hulls.

・4機配置最適形状 D_4 : 単機配置した場合

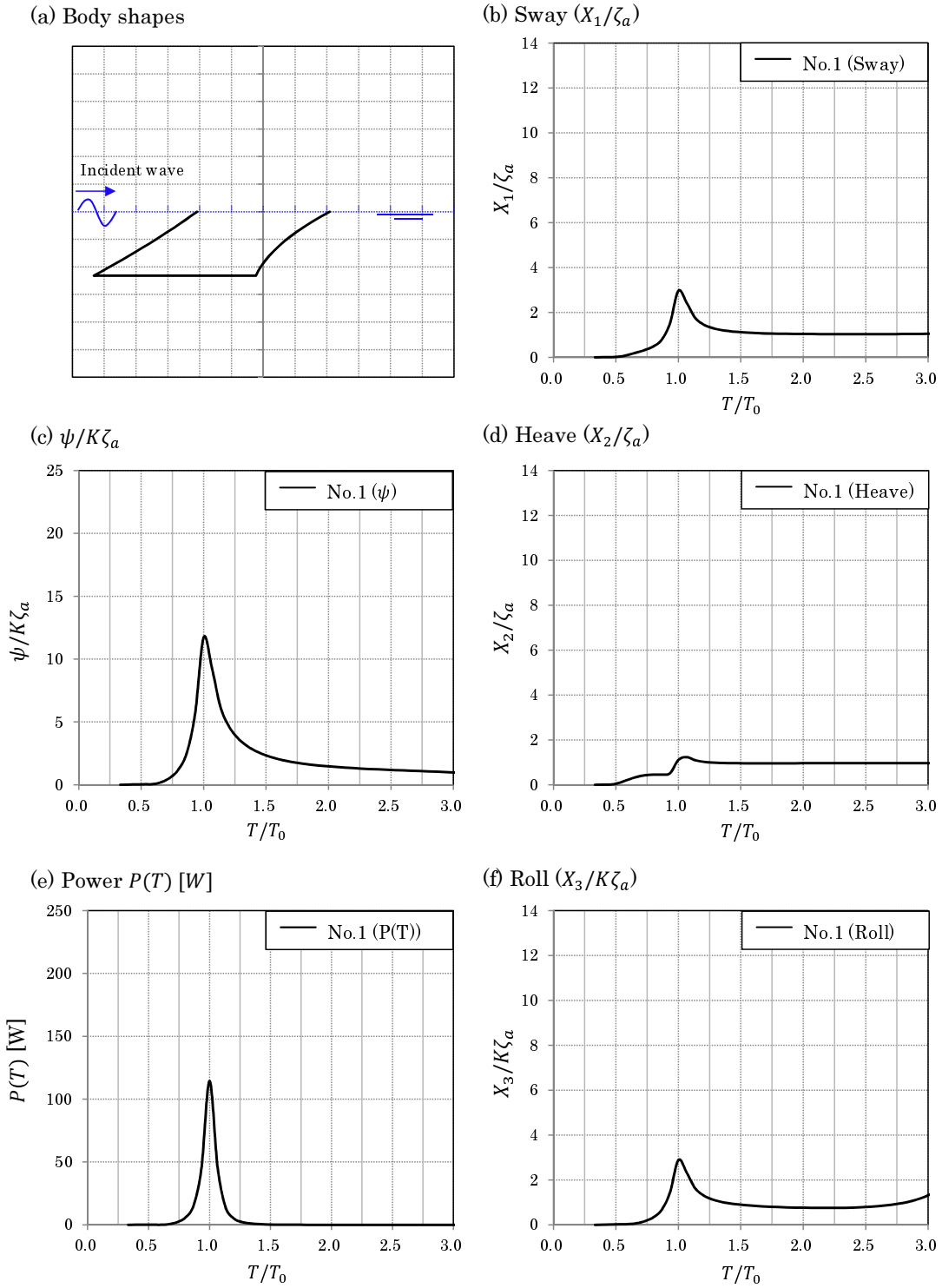


Fig. 4.26: The case of placed D_4 as a single hull.

・4機配置最適形状 D_4 : 2機配置した場合

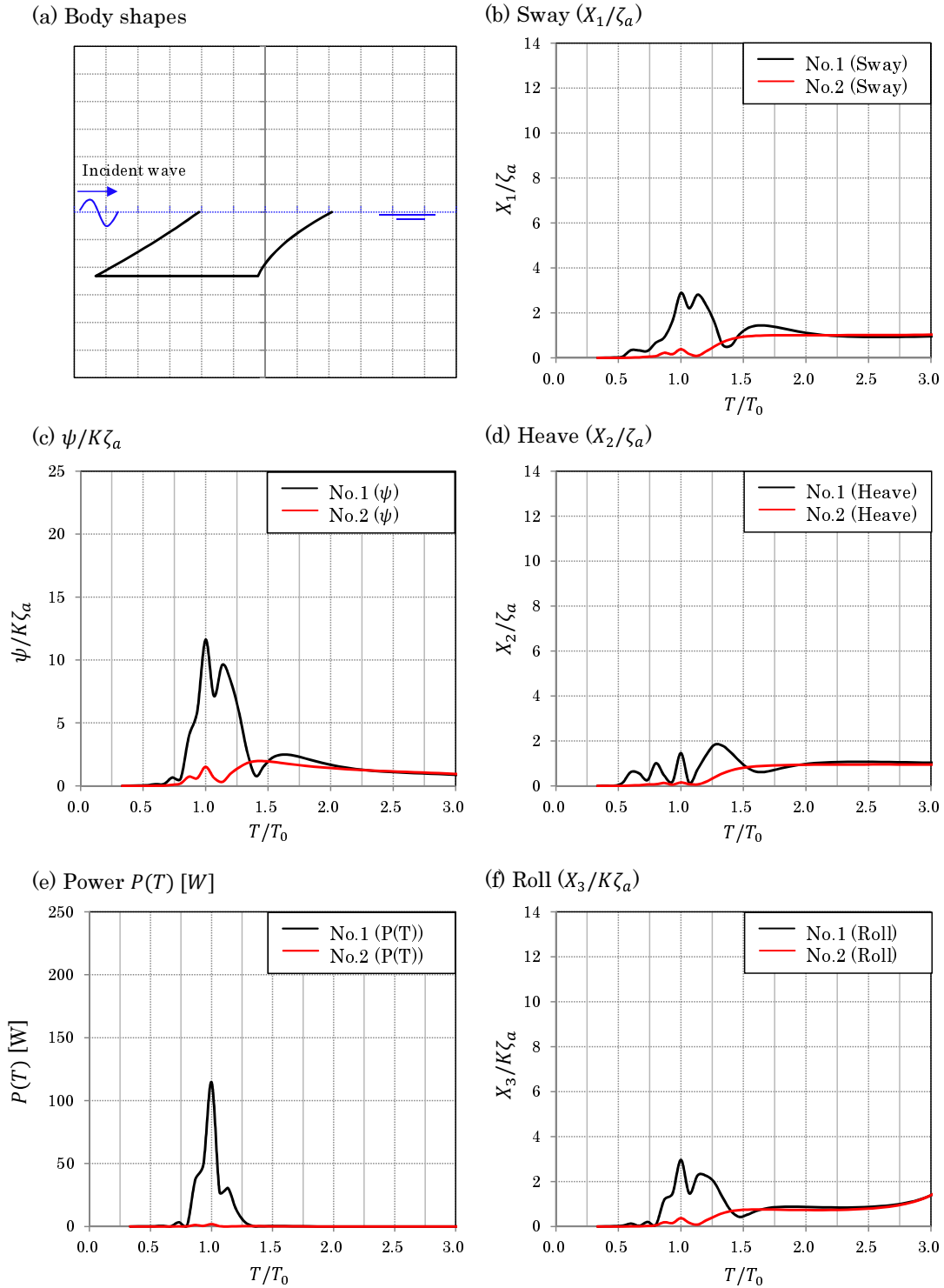


Fig. 4.27: The case of placed D_4 as 2 hulls.

・4機配置最適形状 D_4 : 3機配置した場合

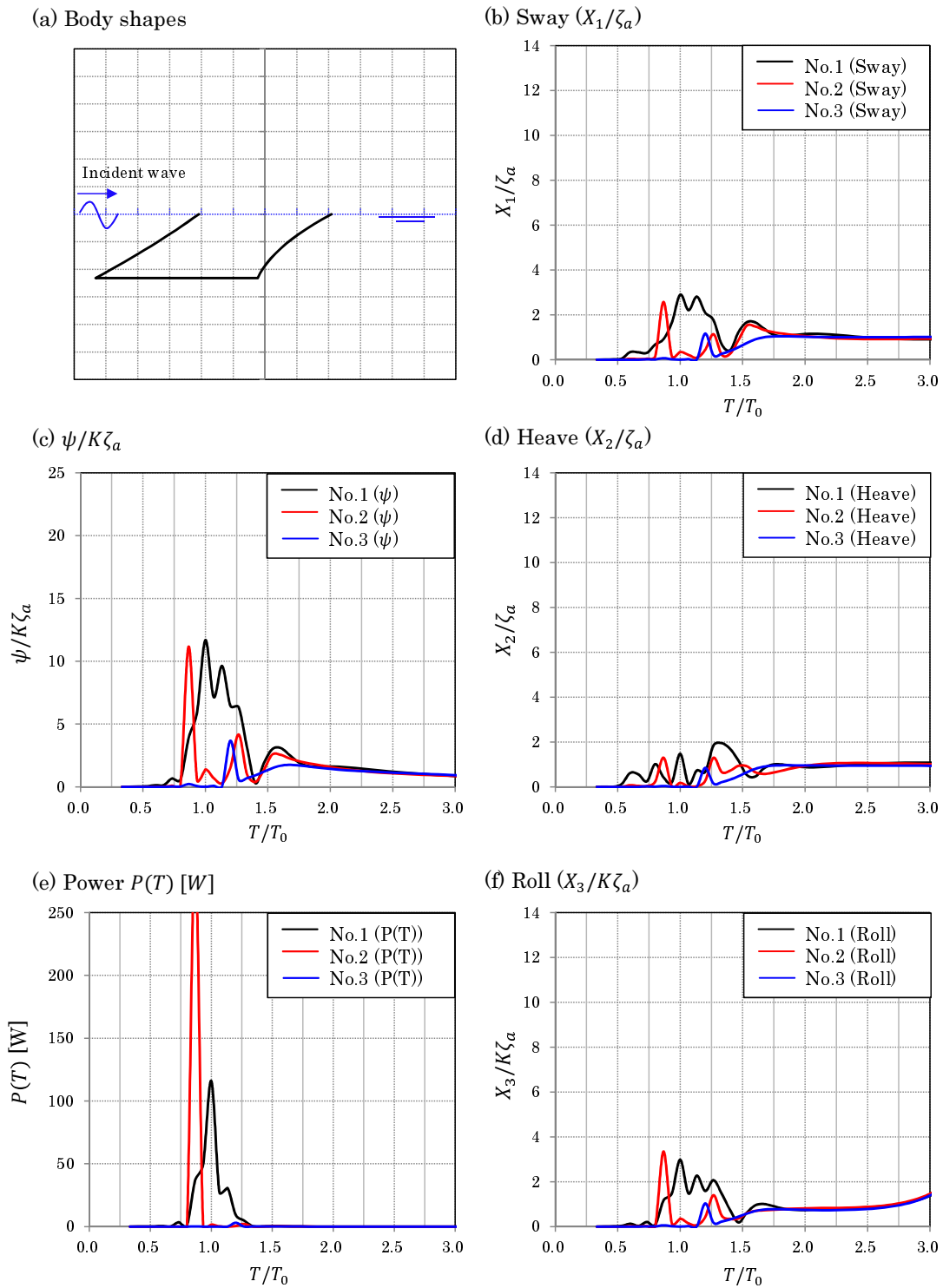


Fig. 4.28: The case of placed D_4 as 3 hulls.

・4機配置最適形状 D_4 : 4機配置した場合

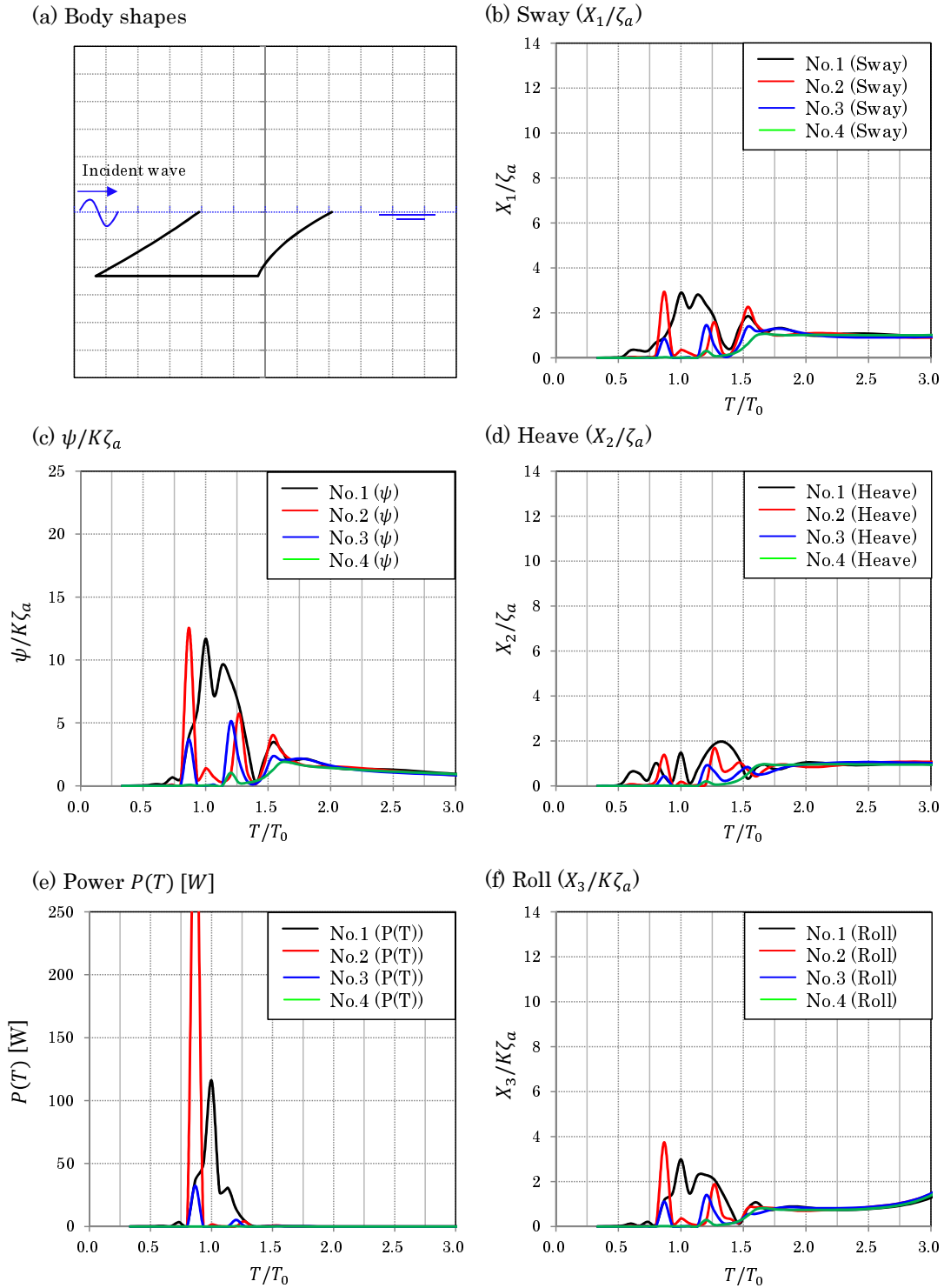
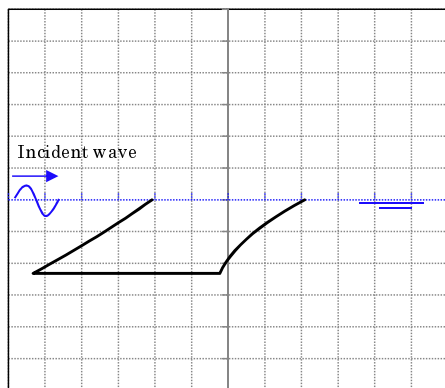


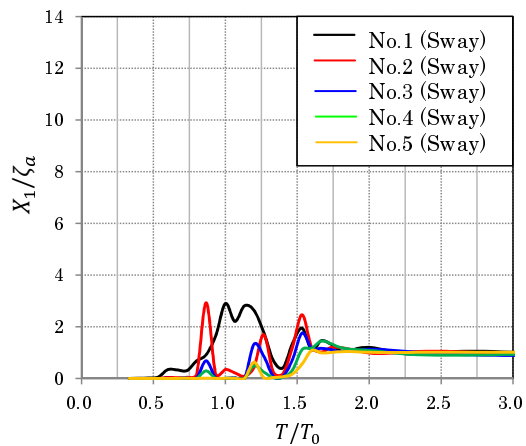
Fig. 4.29: The case of placed D_4 as 4 hulls.

・4機配置最適形状 D_4 : 5機配置した場合

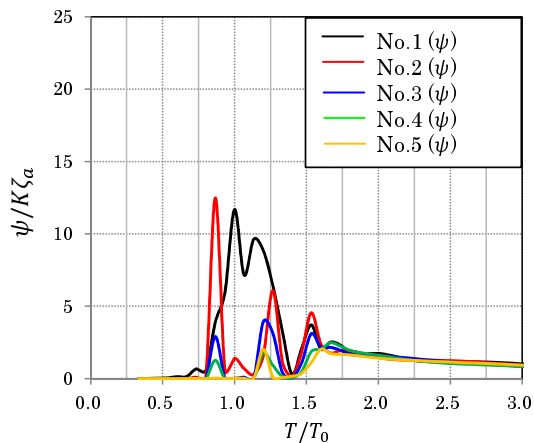
(a) Body shapes



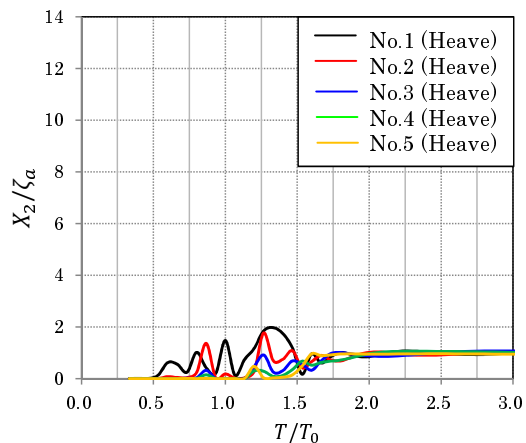
(b) Sway (X_1/ζ_a)



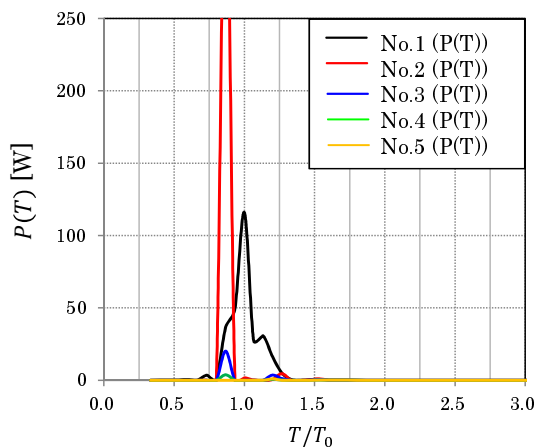
(c) $\psi/K\zeta_a$



(d) Heave (X_2/ζ_a)



(e) Power $P(T)$ [W]



(f) Roll ($X_3/K\zeta_a$)

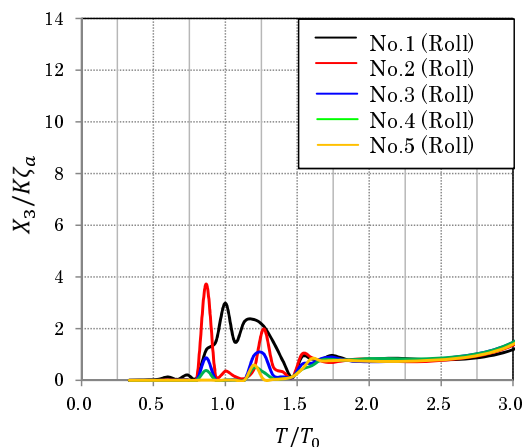


Fig. 4.30: The case of placed D_4 as 5 hulls.

・5機配置最適形状 D_5 : 単機配置した場合

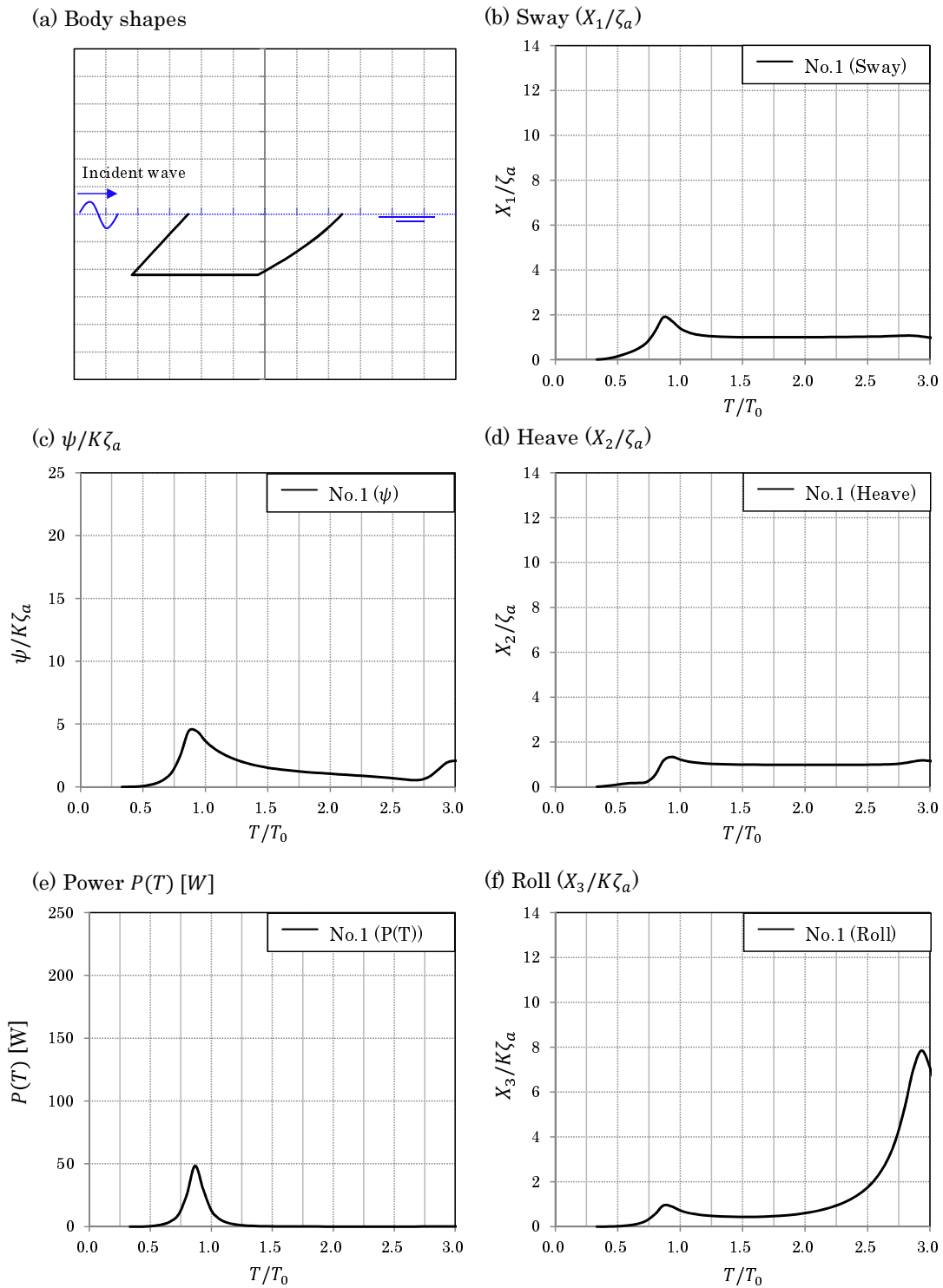


Fig. 4.31: The case of placed D_5 as a single hull.

・5機配置最適形状 D_5 : 2機配置した場合

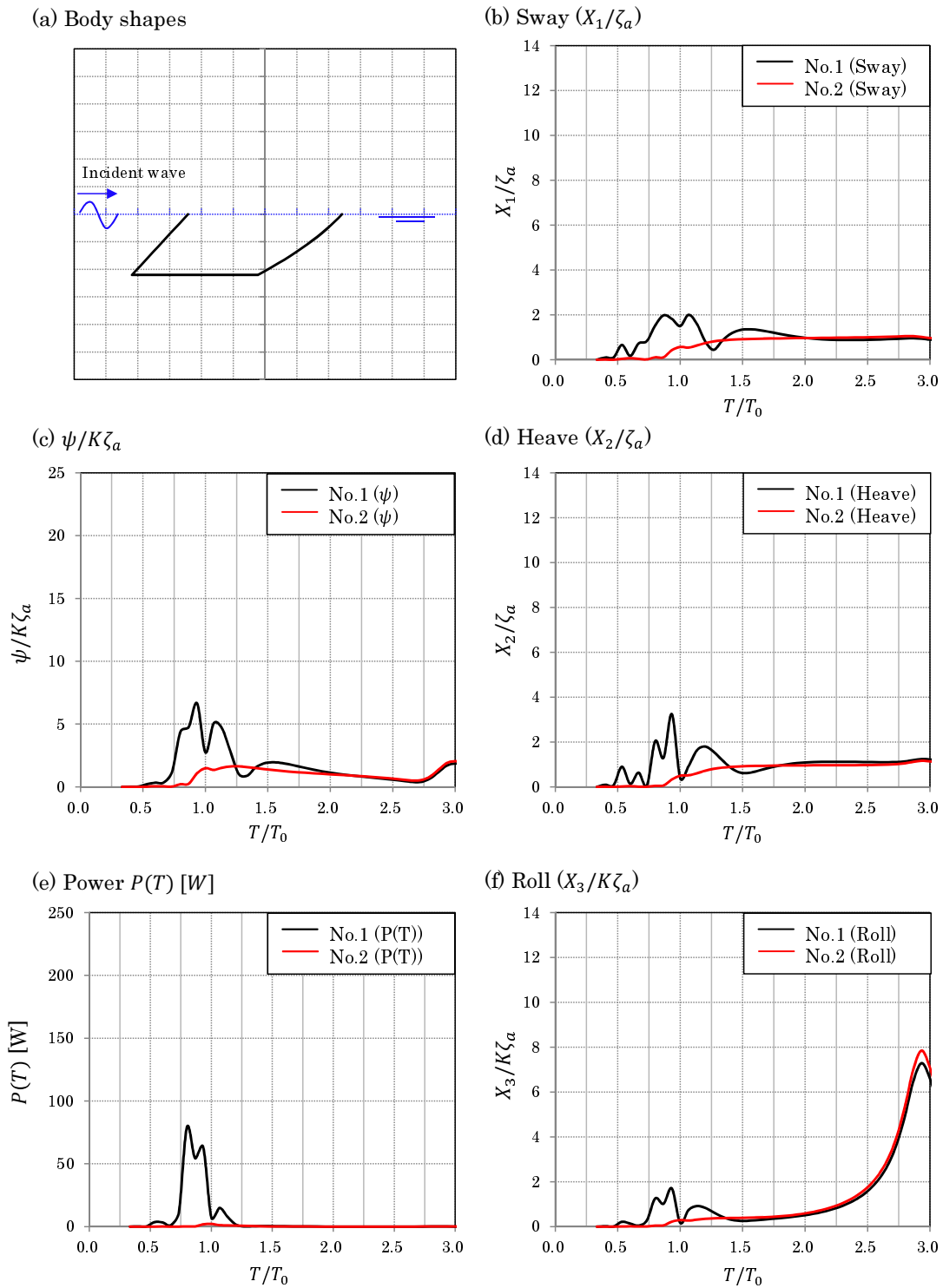


Fig. 4.32: The case of placed D_5 as 2 hulls.

・5機配置最適形状 D_5 : 3機配置した場合

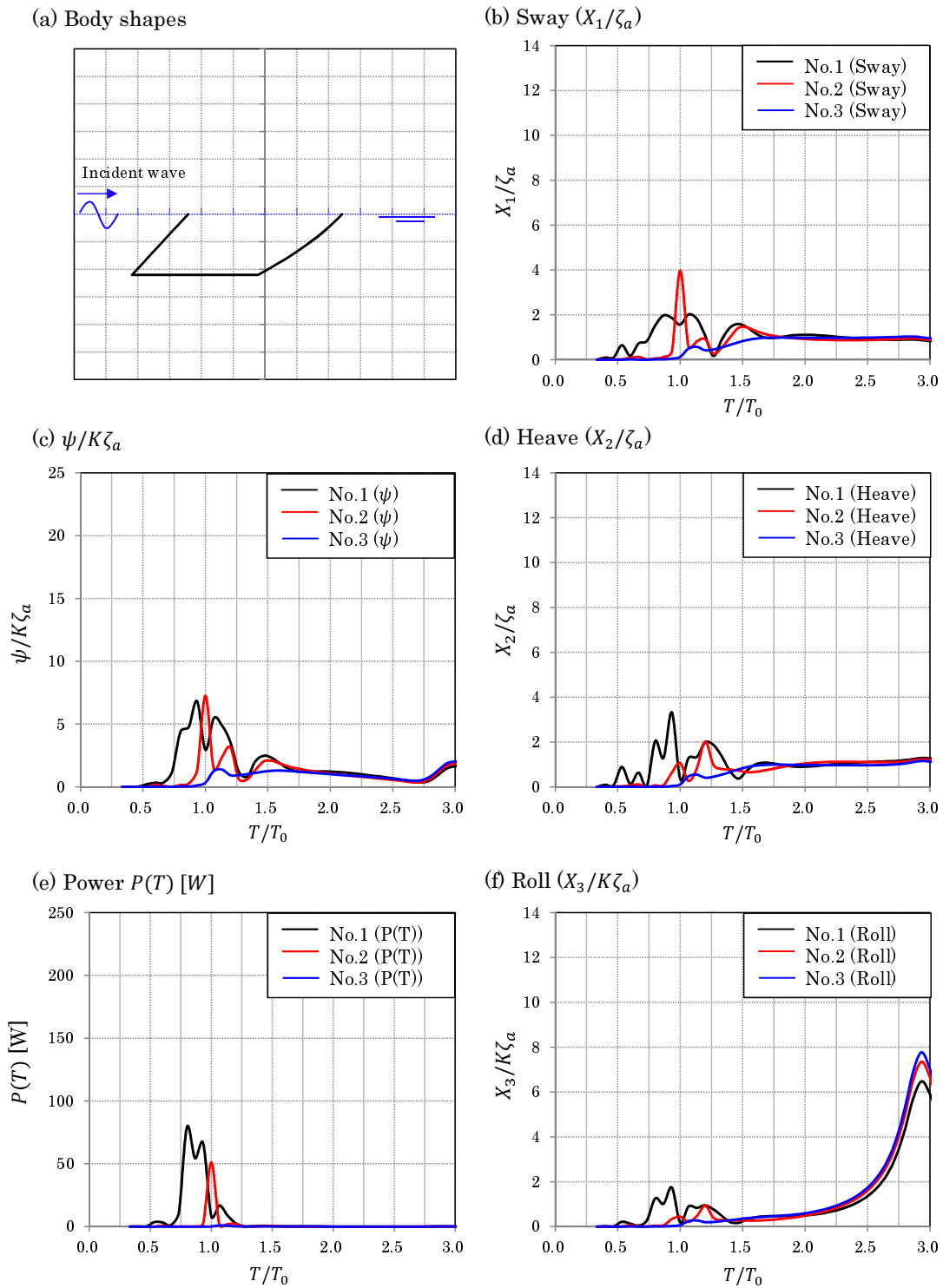


Fig. 4.33: The case of placed D_5 as 3 hulls.

・5機配置最適形状 D_5 : 4機配置した場合

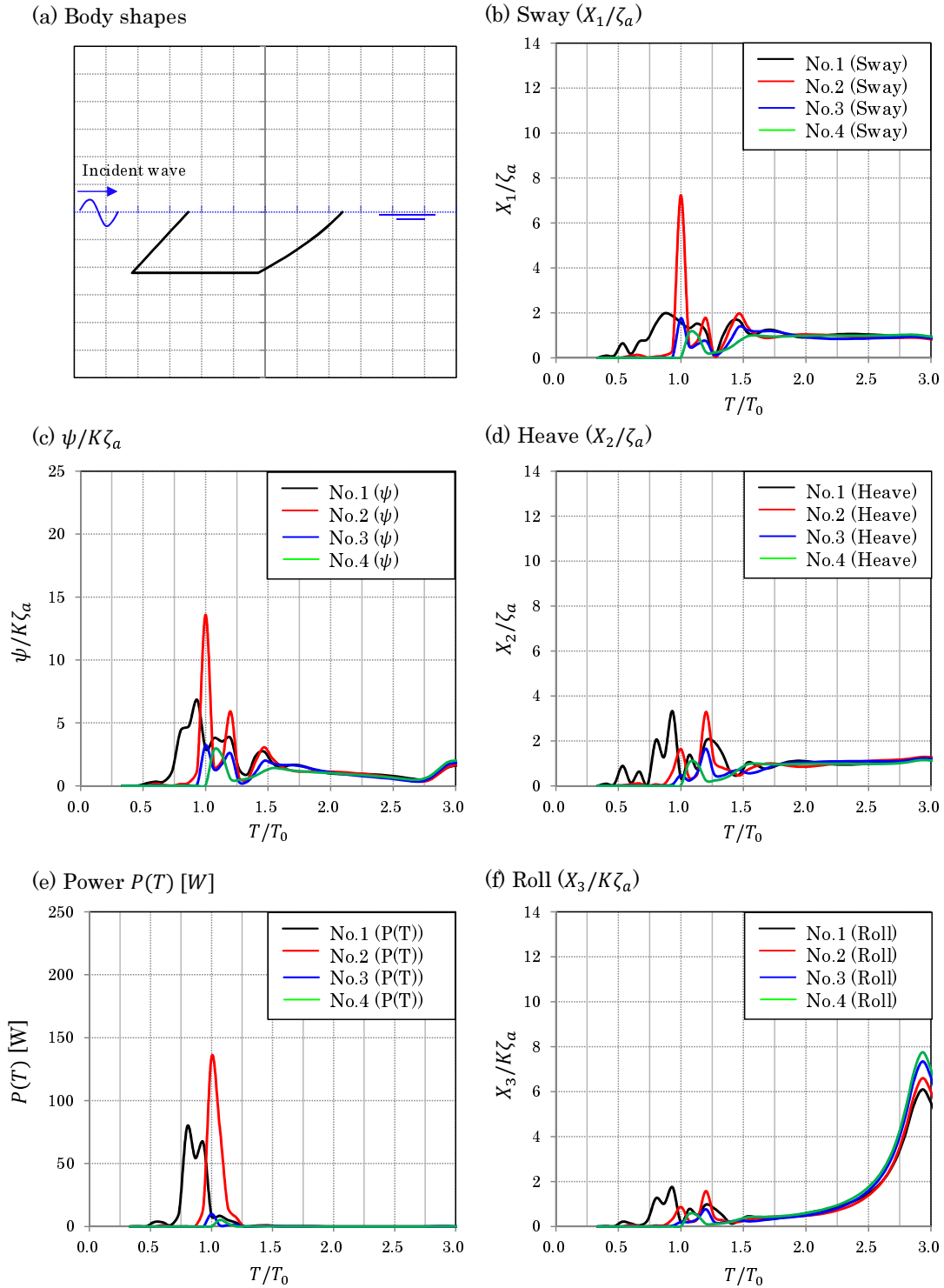


Fig. 4.34: The case of placed D_5 as 4 hulls.

・5機配置最適形状 D_5 : 5機配置した場合

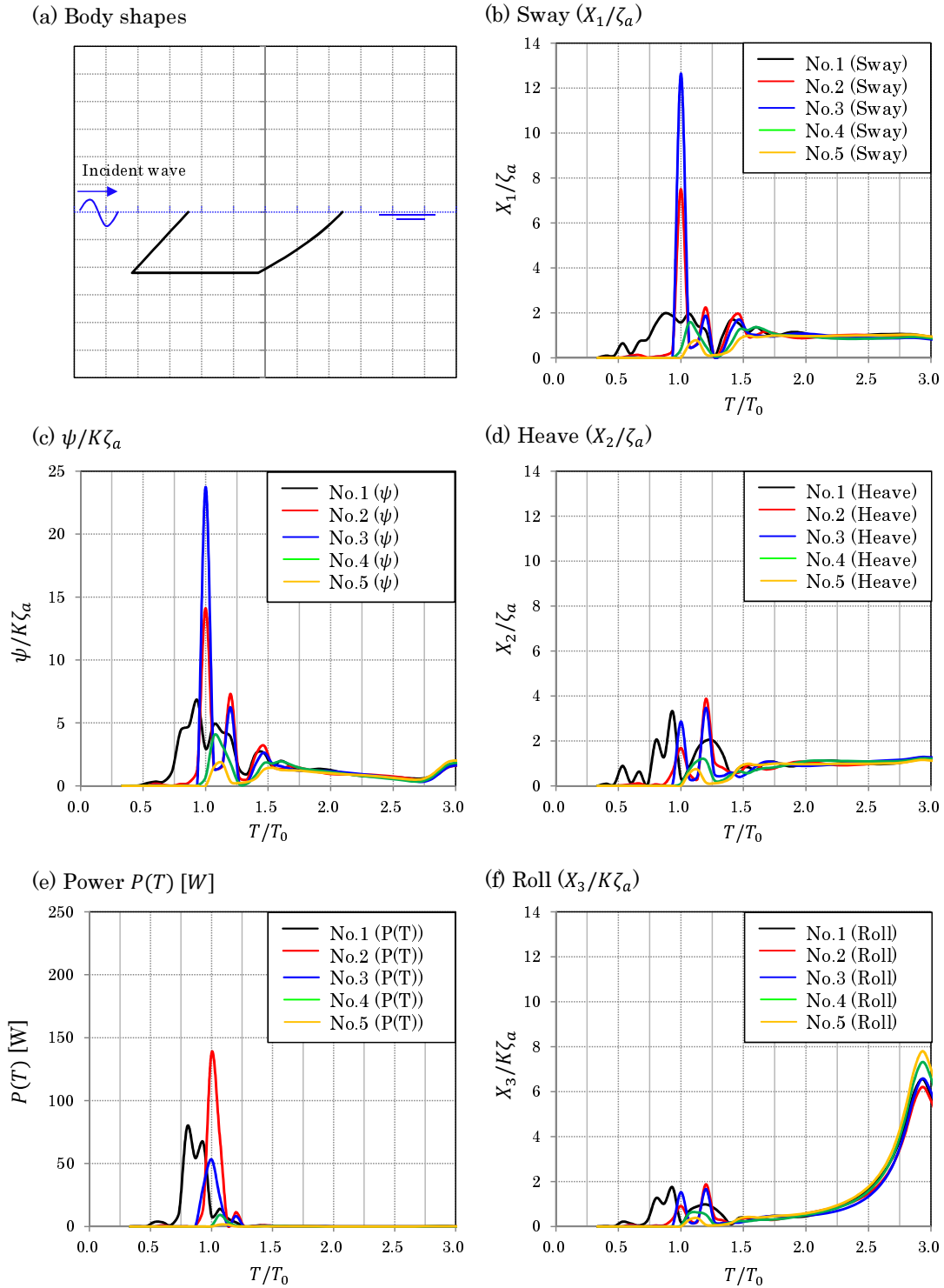


Fig. 4.35: The case of placed D_5 as 5 hulls.

次に、浮体間距離を変化させた場合について検討する。浮体間距離は(4.1)式中の n を変化させることで行うが、Fig.4.36 に Body” D_3 ”を3機配置した場合を例として検討した結果を示す。

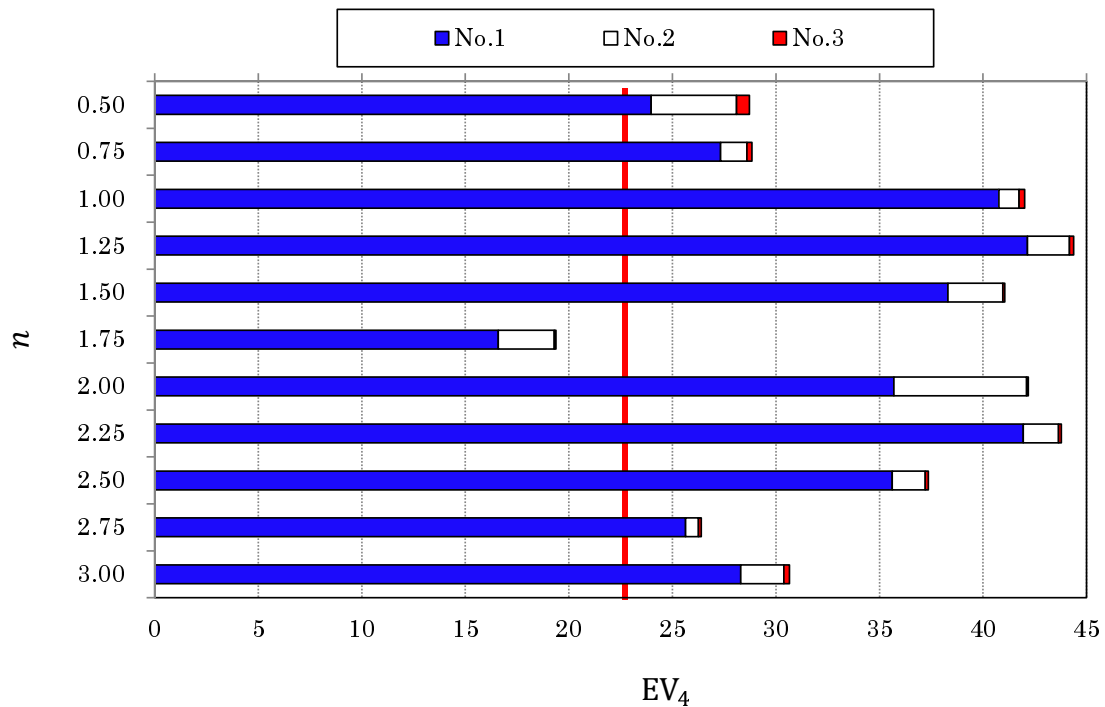


Fig. 4.36: Changes in the EV₄ in case of changing the interval of arrangement.

これまでは $n = 2.00$ に固定した時の結果について論じてきたが、Fig.4.36 を見ると、浮体間距離によって評価値が大きく変化することが確認できる。EV₄=23 に引いた縦線は Body” D_3 ”を単機で配置した場合の評価値である。多くの場合、3機配置することでこれよりも高い評価値を示しているが、 $n = 1.75$ のように単機の方が評価が高くなる場合も存在することがわかる。今回は複数機配置した場合での形状変化を調べた際には $n = 2.00$ に固定して論じてきたが、配置間隔が変わることで、最適形状の傾向もまた変化することが予想できる。

最後に本章で検討した結果についてまとめる。本章ではまず、「波エネルギー収支で評価」する手法と「エネルギー吸収機構の吸収量で評価」する手法を用いて、それぞれ単機配置で最適形状となった形状と複数機配置で最適となった形状が異なることを示した。「波エネルギー収支で評価」する手法では、配置する機数によって異なる形状が探索されたが、形状的特徴は共通していた。一方、「エネルギー吸収機構の吸収量で評価」する手法では、「単機」と「複数機」で形状的特徴が大きく変化した。したがって、序論で述べた「単機配置で優れた性能の浮体形状は、複数浮体を配置した場合においても優れた形状となるのか」に対しては、評価手法によって異なるが、発電機構を想定した「エネルギー吸収機構の吸収量で評価」する手法では、「単機配置で優れた形状」と「複数浮体配置した場合においても優れた形状」であるとはいえない。なぜなら、単機で最適な形状は、自身で波エネルギーを吸収し、後方に透過する波が少ないが、複数機の場合はある程度の波の透過を許して、後方浮体との干渉影響によって吸収するエネルギーを増幅させるためである。

第5章 \overline{GM} 制御による同調運動を想定した検討

可動物体型の波力発電装置は、浮体運動の固有周期と波の周期が同調したとき、エネルギー吸収率が90%以上と高い性能を発揮することを可能とするが、同調周期から離れた周期域では、浮体運動が極端に小さくなるため、波力発電装置として機能しなくなることが課題とされている。実際の海域では、様々な周期の波が混在する不規則波であり、変動が激しい海域では、平均周期も1日のうちに幾度も変動する。そのような環境下で常に大きな動揺を得ることは容易ではない。

この課題の解決案としては、浮体運動や発電機構の固有周期を制御することで、変動する海洋環境に同調させることが、最も効果的ではないかと筆者は考える。ここで述べた浮体運動とは、2次元であれば復原力の働く Heave と Roll を指すが、Heave 運動の固有周期を変化させるためには、浮体形状あるいは浮体質量を変化させる必要がある。一方、Roll 運動の固有周期を変化させるためには、 \overline{GM} (重心高さ)を変化させることにより可能となる。両運動の固有周期を変化させる方法を比較して、 \overline{GM} (重心高さ)を変化させる方法が遥かに容易かつ実用的であると考えられるので、本研究では、 \overline{GM} (重心高さ)を制御することにより Roll の固有周期と波周期を同調させることを考える。

本研究では、 \overline{GM} (重心高さ)高さを制御する方法として、1997年に平山ら⁴³⁾⁴⁴⁾が開発した VWS システム (Vertical Weight Stabilizer) を参考とした。VWS システムとは、排水量の数%程度の質量の錘を時々刻々、垂直方向に移動させることによって減揺効果を得るというアンチローリングシステムのことであり、主に船体の横揺れを低減することを目的としている。

\overline{GM} (重心高さ)制御する方法の一例として Fig.5.1 と Fig.5.2 にそれぞれを概念図及びフロー図を示す。Fig.5.1 に示した G と M は、それぞれ重心とメタセンタである。浮体上部に鉛直に立てた支柱に沿って可動式の錘 (Movable weight) を上下することにより浮体の \overline{GM} (重心高さ) を制御して、回転運動の固有周期を変化させる。

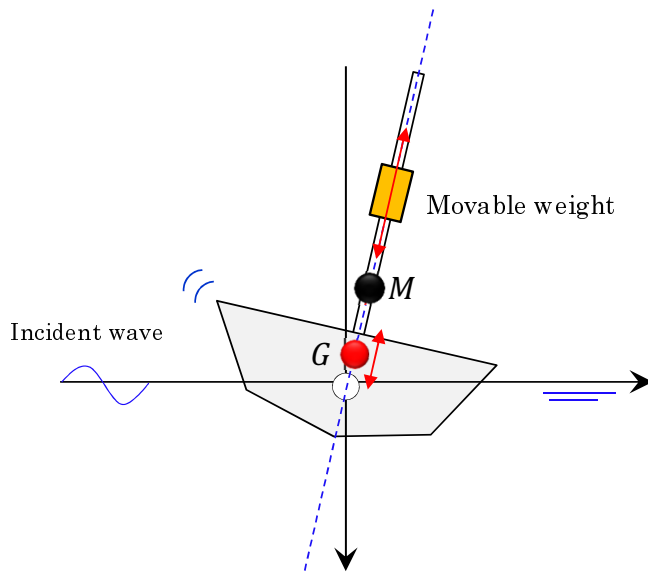


Fig. 5.1: Conceptual diagram of controlling the \overline{GM} .

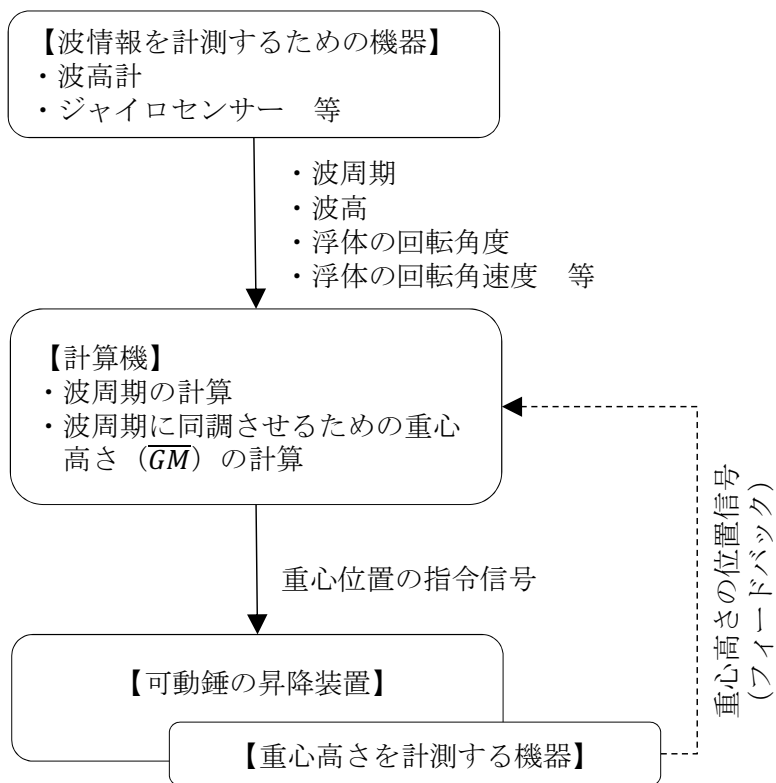


Fig. 5.2: Flow chart of the control signal.

本研究では、上述した浮体運動の固有周期や発電機構の固有周期を、変動する波周期と同調制御することが可能であるとした場合、そのような条件に適した形状が存在するのか検討した。前章までは、回転運動の固有周期に影響する \overline{GM} や、発電機構の固有周期は常に一定として検討していたが、本章では、浮体運動の固有周期や発電機構の固有周期を、変動する海象環境に合わせて、同調制御することを検討した結果について述べる。

第一段階として、5.1 節で \overline{GM} 制御することにより、浮体運動を増幅できるのか確認することを目的とした実験について述べる。第二段階として、5.2 節で、 \overline{GM} 制御することにより、発電機構の仕事率にどういった影響を与えるのか検討した結果について述べる。最後に、5.3 節で、同調制御することを想定した場合において、これに適した形状が存在するのか検討した結果について述べる。

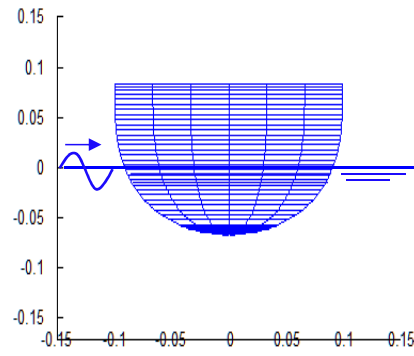
5.1 \overline{GM} 制御による動揺増幅確認実験

ここでは、検討の第一段階として、 \overline{GM} 制御することにより、浮体運動を増幅できるのか確認するために行った実験について述べる。 \overline{GM} を制御する方法であるが、前述したように平山ら⁴³⁾⁴⁴⁾が開発した VWS システムを参考にして、 \overline{GM} 制御する方法とした。VWS システムとは、排水量の数%程度の質量を時々刻々、浮体に対して上下方向に移動することにより減揺効果を得るという装置であり、主に船体の横揺れを低減することを目的としている。①「Roll の固有周期を波周期からずらすことによる減揺効果」②「重心位置変化が引き起こす復原力変化による減揺効果」③「錘運動が引き起こす船体運動エネルギーの散逸による減揺効果」の3つの原理によって減揺効果を得ている。本研究では浮体の運動を大きくすることを目的としているため、VWS 本来の目的とは異なるが、上述した減揺原理①を「固有周期を波周期に合わせる」ことで本研究の目的と一致する。

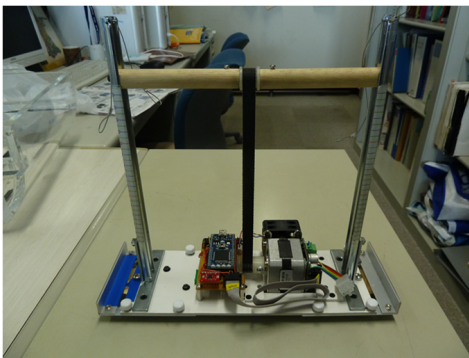
本研究では、動揺を大きくするためにこのシステムを採用したが、船体動揺を抑える本来のシステムと区別するため、以下より「錘昇降装置」と呼ぶこととする。

Fig.5.3(a) に今回の実験で用いた供試模型を示す。 \overline{GM} 制御の効果をわかりやすくするため、没水部が半円柱の形状を用いた。また、水槽実験用に作製した錘昇降装置を Fig.5.3(b) から (c) に示す。Fig.5.3(b) のように、支柱の上部とモーターを軽量のベルトで繋ぎ、この間を移動錘 (Fig.5.3(d)) が上下する。移動錘の昇降には秋月電子のステッピングモータ (SM-42BYG011:Fig.5.3(c)) を採用した。これにより高精度多段停止が可能な機構とした。また、モーターの制御は ARM 社の mbed (エムベッド) を介して行う。移動錘は Fig.5.3(d) のような真鍮製の円柱棒を用いた。質量は 300g であり、装置を搭載した浮体質量に対して約 6%程度である。

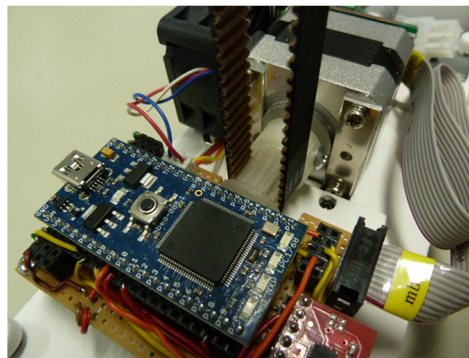
(a) Floating body for the experiment



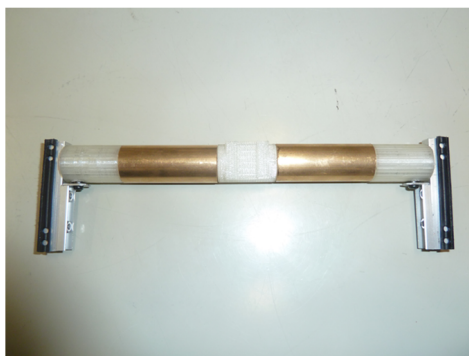
(b) The view of the movable weight lifter



(c) The microcomputer and the stepping motor



(d) The movable weight



(e) The movable weight lifter on the floating body

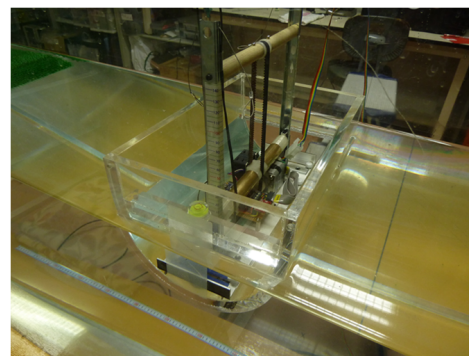


Fig. 5.3: The floating body and weight lifter for the experiment.

実験に用いた浮体と錘昇降装置の緒元を Table5.1 に示す.

Table 5.1: Principal particulars of the floating body and the movable weight lifter.

Parameters related to floating body	Value
Maximum length (X direction) L [cm]	26.2
Width B [cm]	30.0
Depth D [cm]	15.7
Draft d (with movable weight lifter)[cm] d [cm]	8.25
Displacement (with movable weight lifter) W [kgf]	47.5
Parameters related to the movable weight lifter	Value
Mass of movable weight lifter (without movable weight) [kg]	1.10
Mass of movable weight [kg]	0.30
Range of movement of the movable weight [cm]	0~13.5

Fig.5.4 は錘昇降装置を搭載した状態で可動する錘を最下端から最上端まで移動させた時の固有周期の推移を示している. 最下端で 0.79[sec], 最上端で 1.09[sec], その間は 2 次関数的に増長していく様子が確認できる.

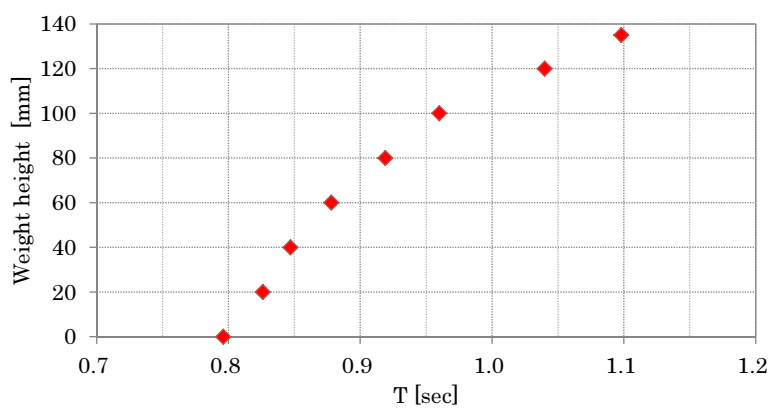


Fig. 5.4: Relationship of the height of the movable weight and natural period.

水槽実験は、佐賀大学海洋エネルギーセンターの水槽（ $18 \times 0.85 \times 0.90$ [m]）で行った。Fig.5.5のように浮体前後にバネを取付けて係留した。ただし、上下揺れと縦揺れを拘束することがないように十分長くて柔軟なバネを用いた。浮体運動の計測項目は左右揺れ（Sway），上下揺れ（Heave），横揺れ（Roll）であり，水槽前面に設置した追跡カメラにより計測した。波高計は浮体の前後および重心の真横の3カ所で計測した。

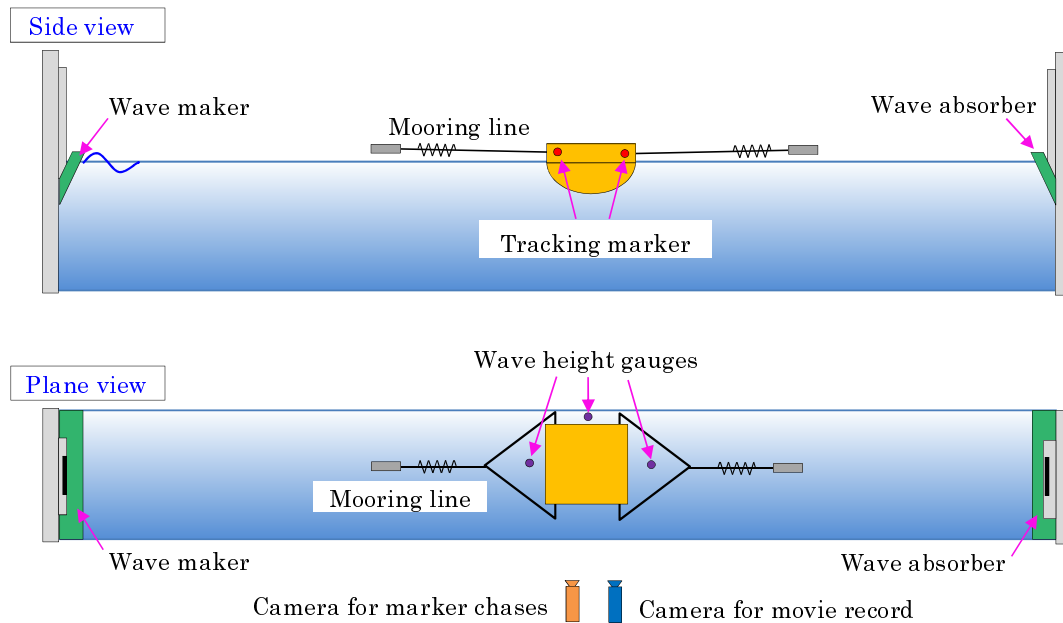


Fig. 5.5: Layout of the experiment for confirming the effect of controlling \overline{GM} .

まず、可動する錘を移動範囲の最下端および最上端で固定した状態における運動を確認する。この時の周波数応答関数を Fig.5.7 および Fig.5.7 に示す。Roll 運動の固有周期は最下端に固定した状態で 0.79 [sec]，最上端で 1.08 [sec] 付近にある。また、いずれにおいても 数値計算と実験値の間で良好に一致していることも確認できる。

次に入射波周期に合わせて移動錘を制御したときの結果を Fig.5.8 から 5.13 に示す。一段目から順に可動する錘の最下端からの移動量，Roll 角度，Heave，Sway を示している。また，入射波が浮体に到達してからしばらく経つまでの間，可動する錘は最下端に固定した状態としている。

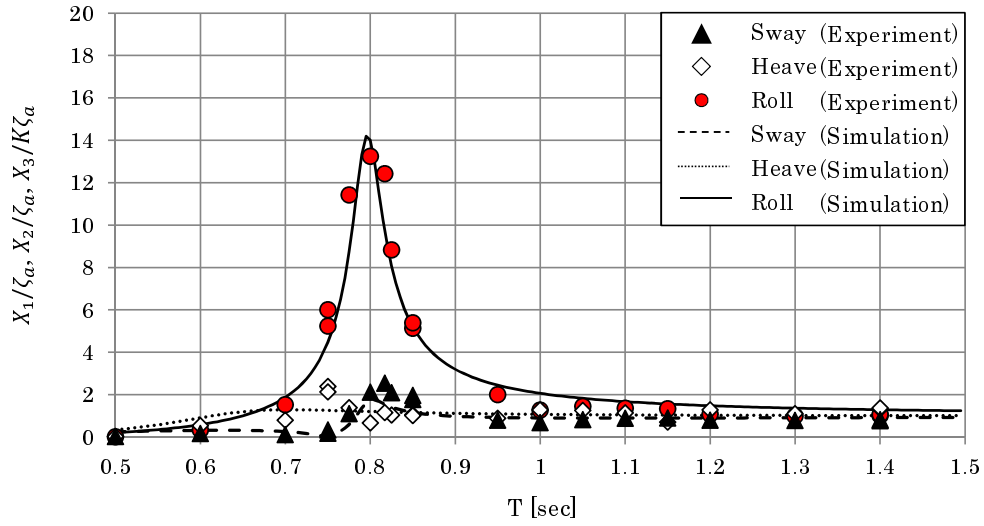


Fig. 5.6: Response Amplitude Operators (Fixed at the lower end).

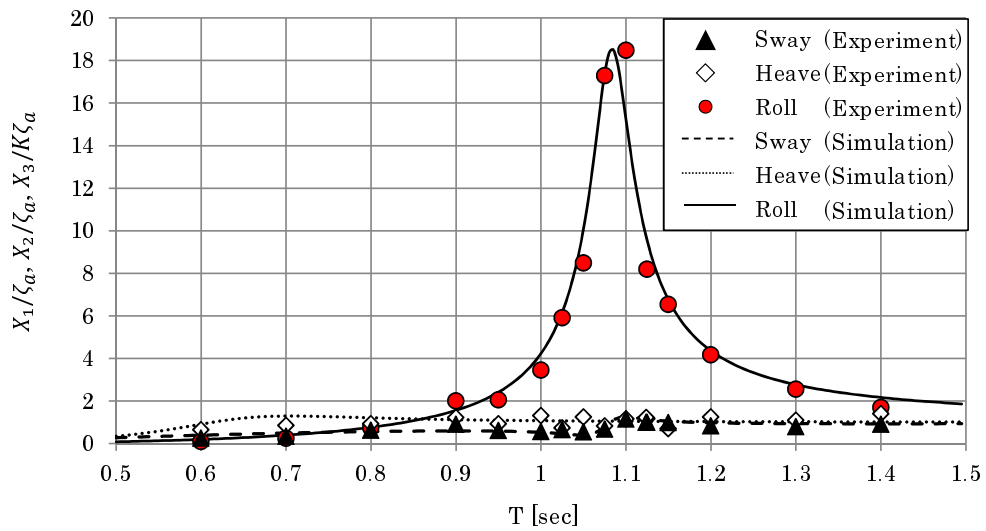


Fig. 5.7: Response Amplitude Operators (Fixed at the higher end).

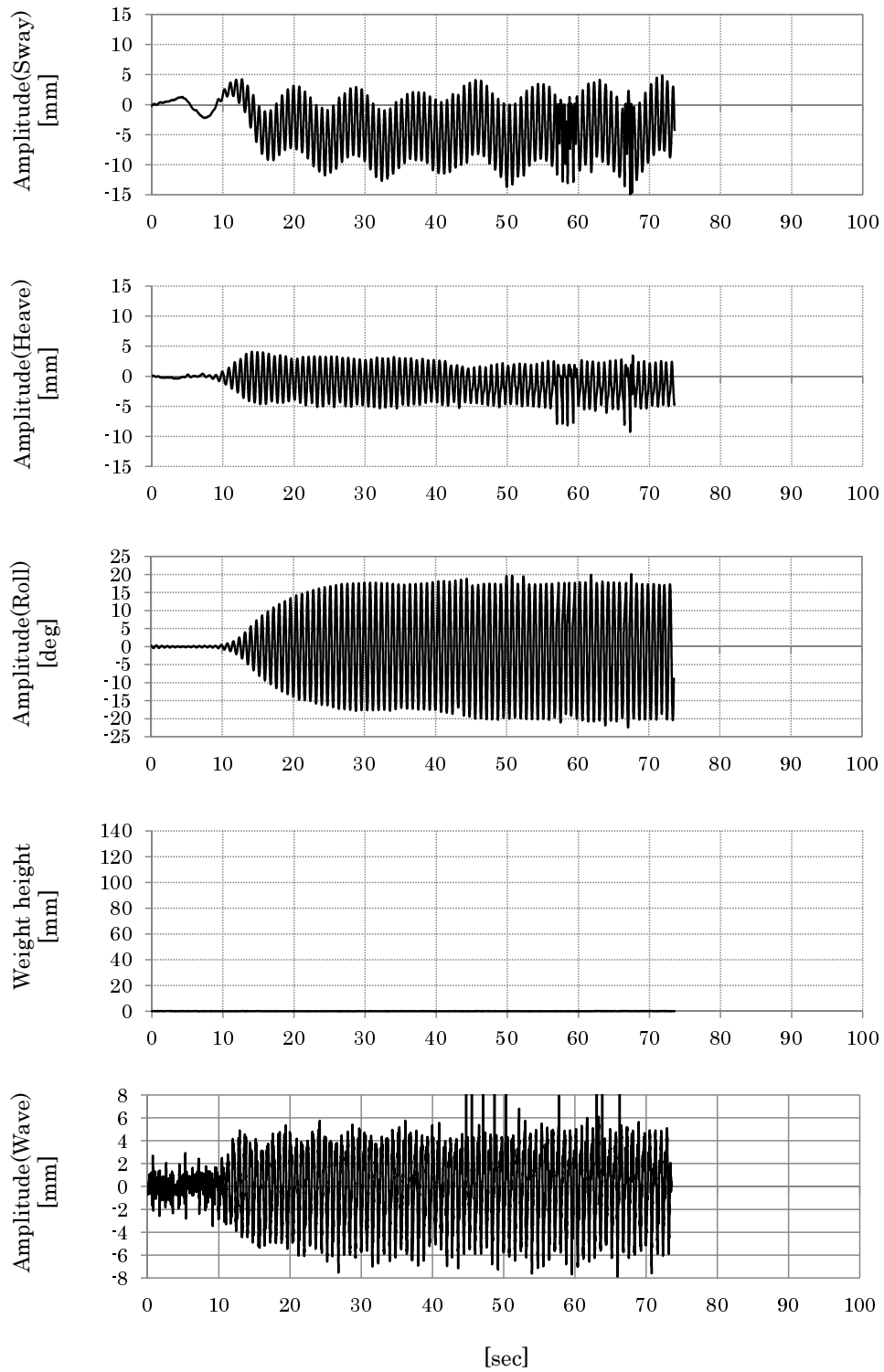


Fig. 5.8: Time history of the motions ($T=0.80$ [sec]).

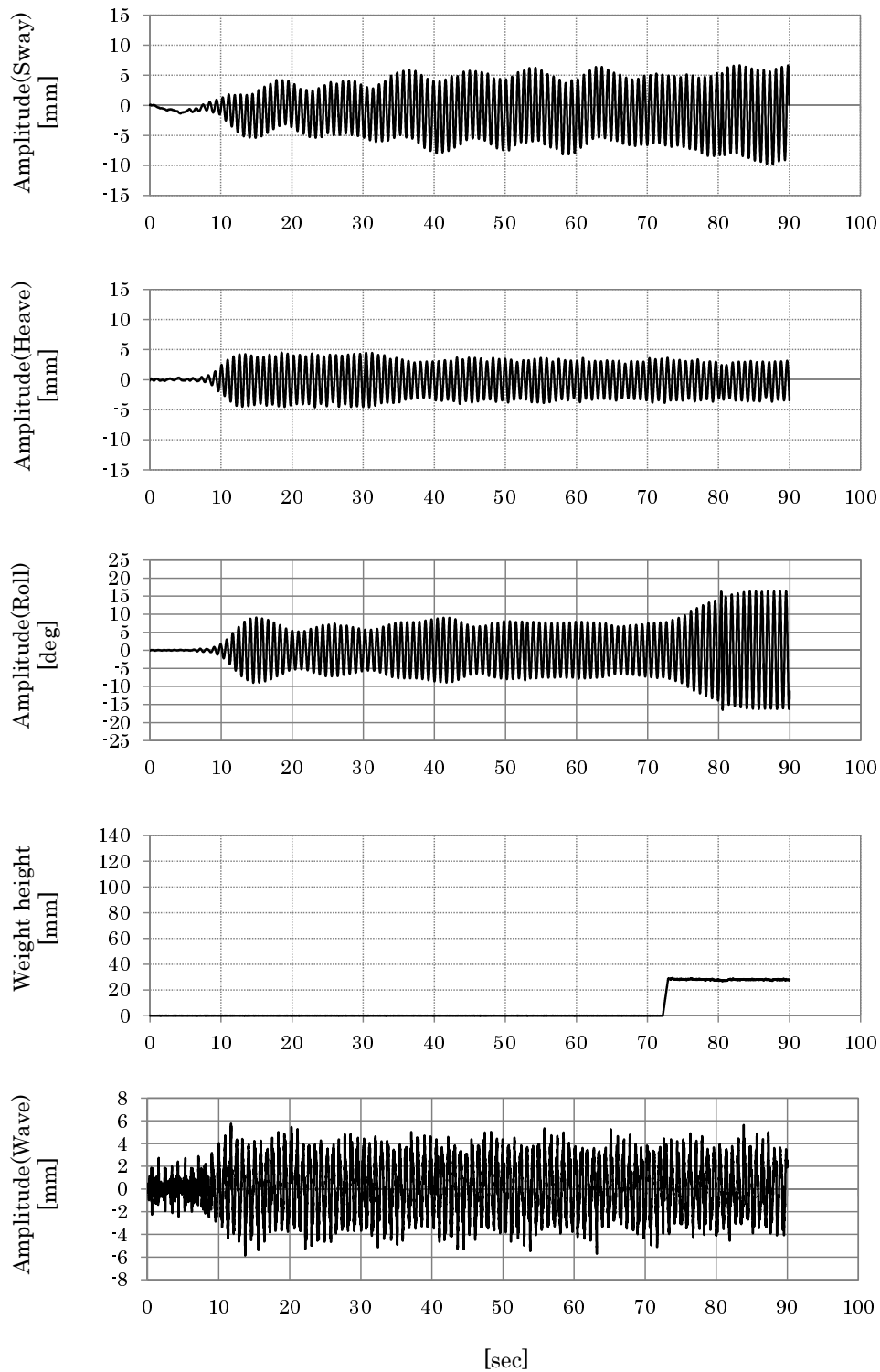


Fig. 5.9: Time history of the motions ($T=0.85[\text{sec}]$).

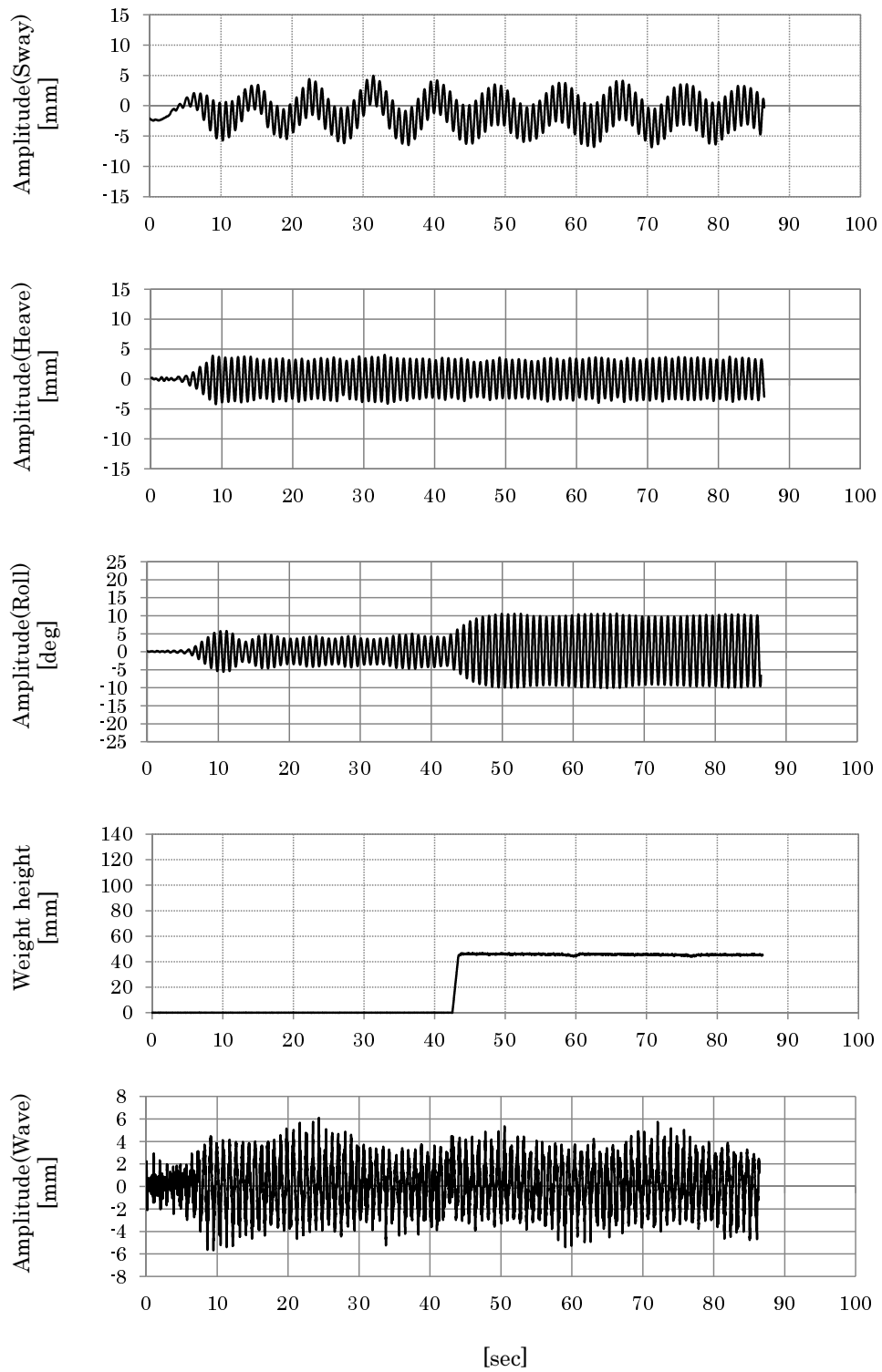


Fig. 5.10: Time history of the motions ($T=0.90[\text{sec}]$).

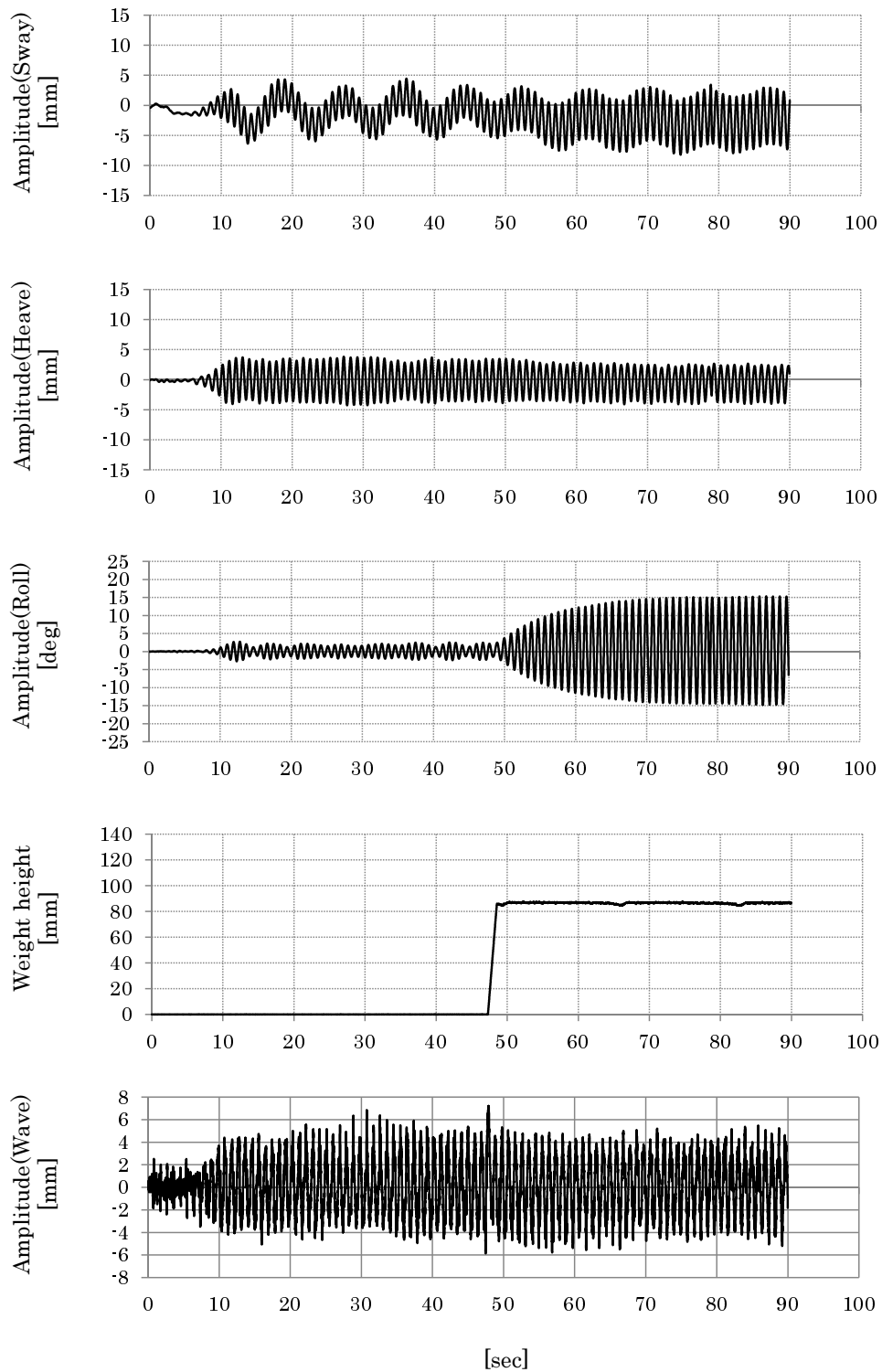


Fig. 5.11: Time history of the motions ($T=0.95$ [sec]).

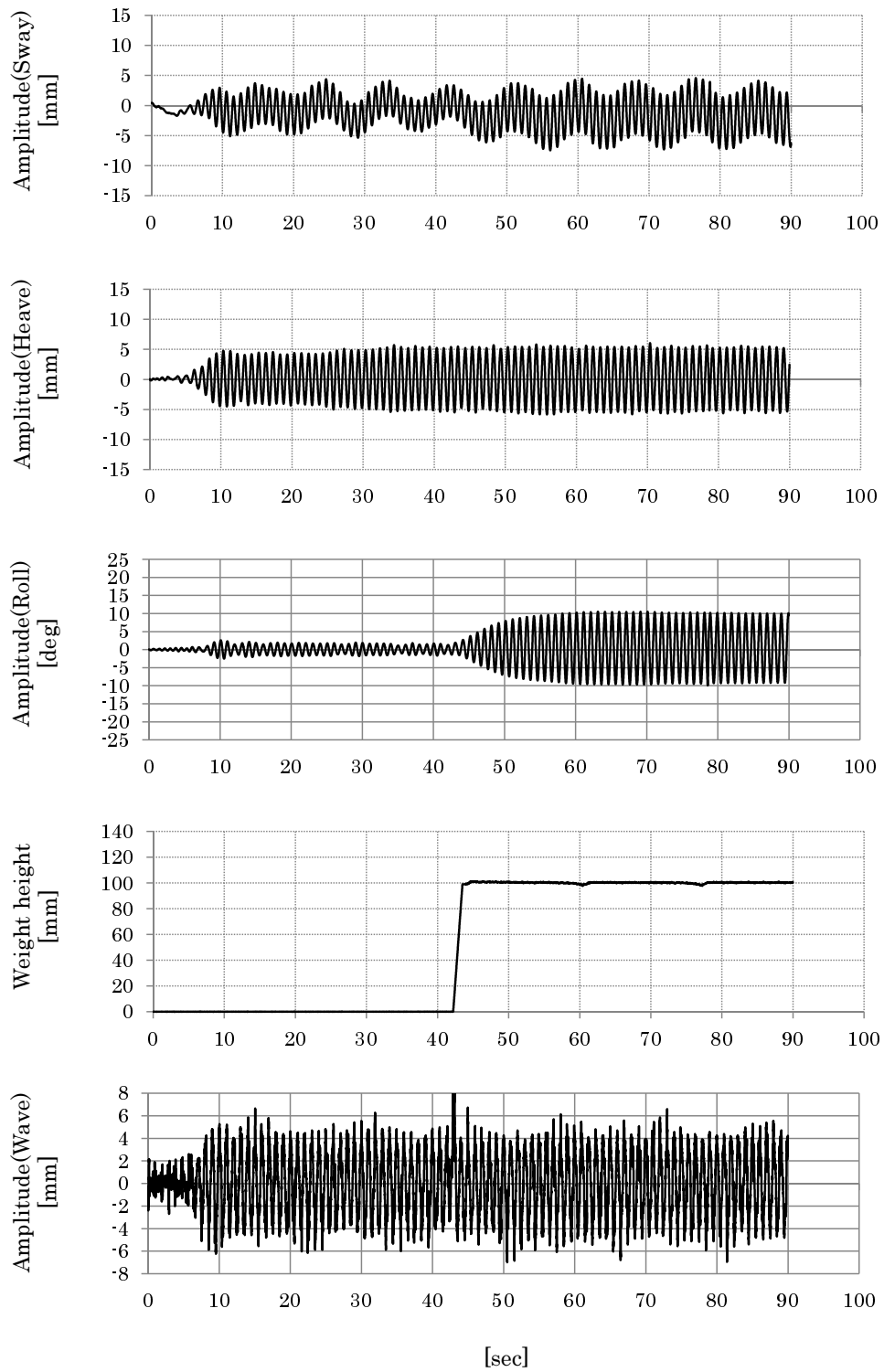


Fig. 5.12: Time history of the motions ($T=1.00$ [sec]).

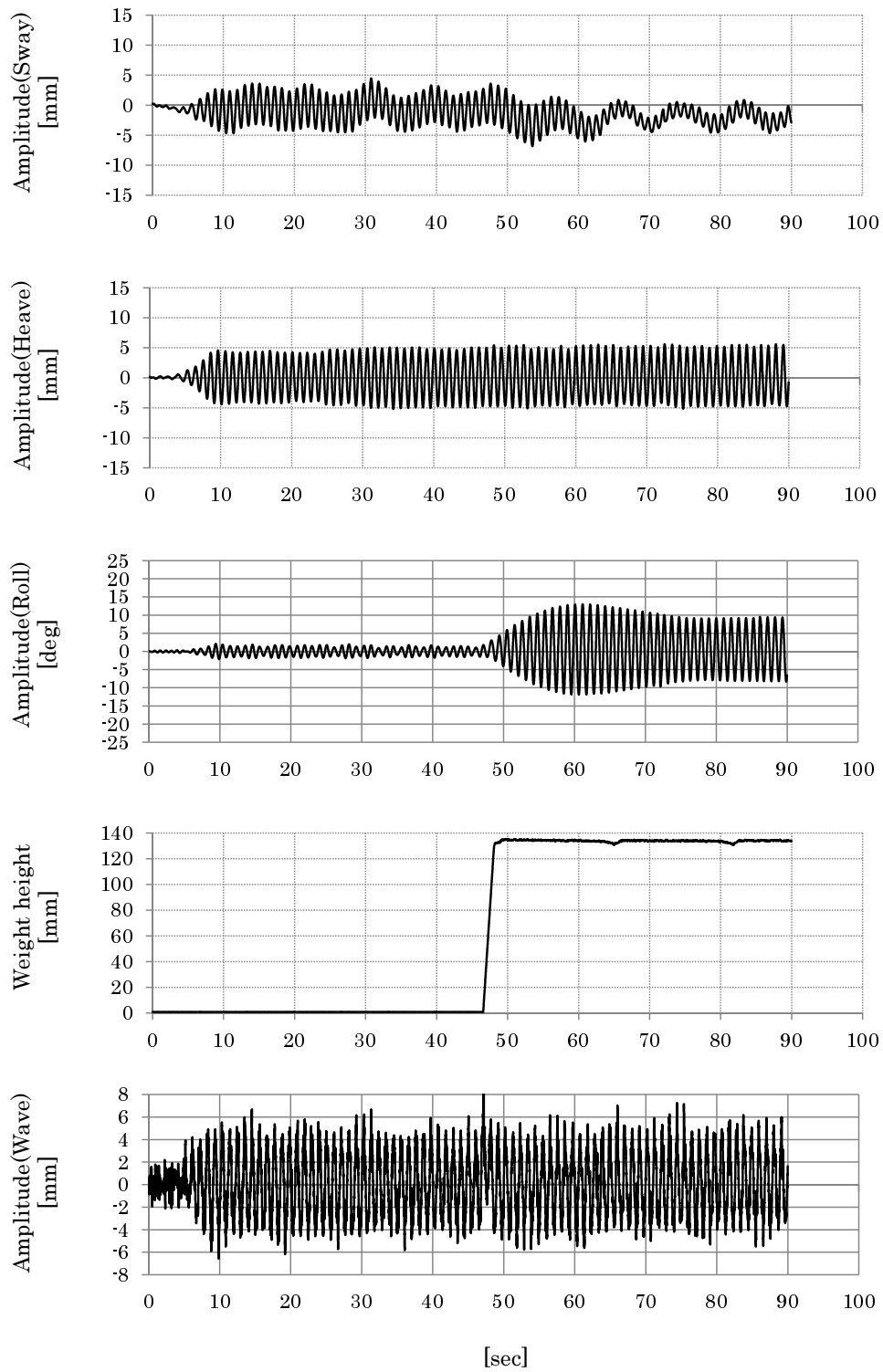


Fig. 5.13: Time history of the motions ($T=1.05[\text{sec}]$).

可動する錘を最下端に固定した状態と入射波周期に合わせて移動させたときの応答を Fig.5.14 に示す。

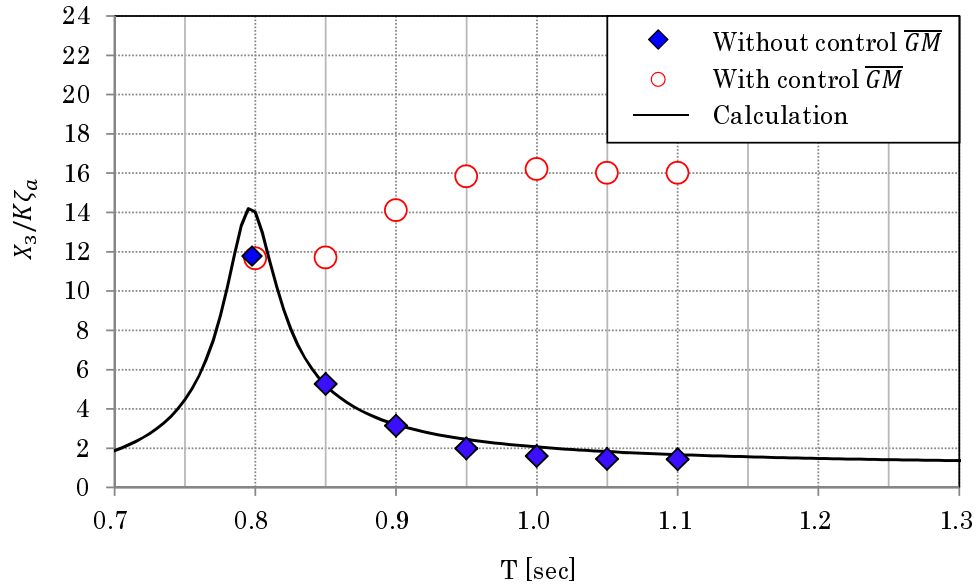


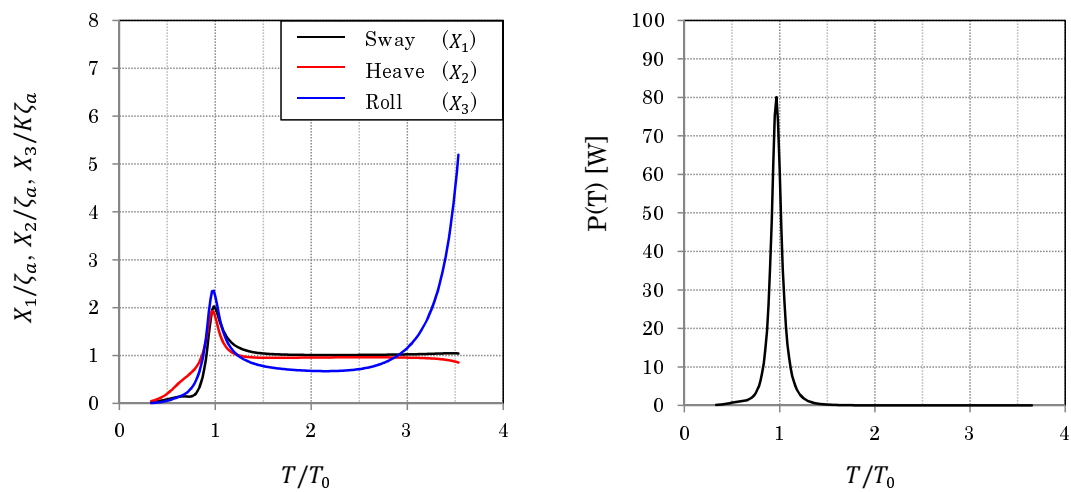
Fig. 5.14: Comparison of the response amplitude of before and after the movement of the movable weight.

Fig.5.14 を見ると、可動する錘が最下端にある状態ですでに入射波周期と浮体の固有周期が一致している $T=0.8[\text{sec}]$ を除いた全周期において、錘昇降装置によって可動する錘を移動させた後の状態の方が応答振幅が大きくなっている様子が確認できる。特に $T=1.1[\text{sec}]$ では最も影響が大きく、およそ8倍応答が大きくなっている。この結果より、入射波周期に合わせて重心高さを適切に変化させることは、幅広い周期域で浮体の回転運動を大きくすることに対して有効であると考えられる。

5.2 \overline{GM} 制御と発電機構の仕事率の関係

次に、 \overline{GM} を制御する際の注意点について述べる。これは第 1 章 2.2 節で明らかにしたことであるが、Heave と Roll の固有周期が接近すると、それぞれの応答のいずれか、もしくは一方が小さくなってしまうためである。Fig.5.15 は、ある形状において、 \overline{GM} を制御していない状態と制御している状態における応答振幅と仕事率 $P(T)$ を比較したものとなっている。

(a) Without control \overline{GM}



(b) With control \overline{GM}

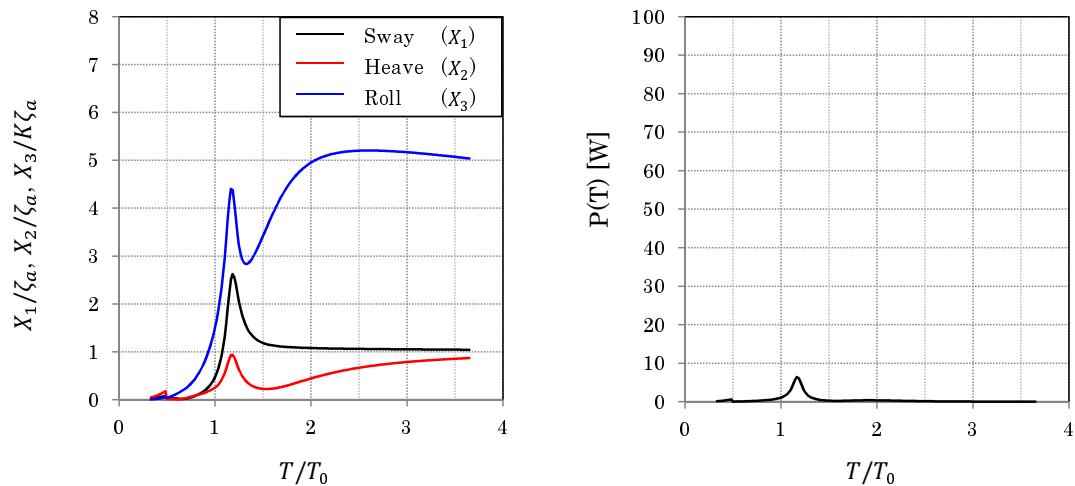


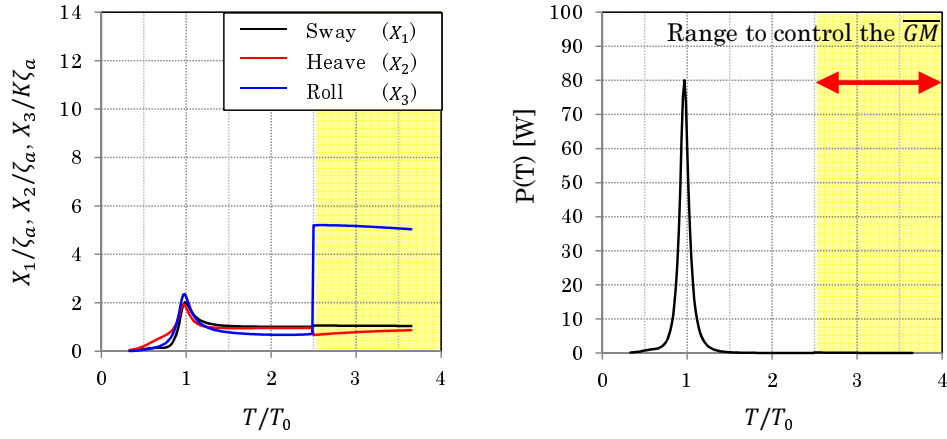
Fig. 5.15: RAO and power in the state of without and with control the \overline{GM} .

Fig.5.15 より RAO を比較する. (b) の RAO をみると, \overline{GM} を変化させたことにより, 全体的に Roll が大きくなっていることが確認できる. 特にピークよりも長周期域ではこの効果が顕著となる. 一方, Sway は長周期域における応答は変わらず 1 に収束しているが, ピークでの応答は多少大きくなっている. これらの事は, 発電機構の仕事率を大きくするためには, プラスに作用するように思われるが, Heave の応答は全体的に小さくなり, また, いずれの運動もピークの位置が長周期側へと変化している事も確認できる. これらの変化は仕事率に対してマイナスに作用することになる.

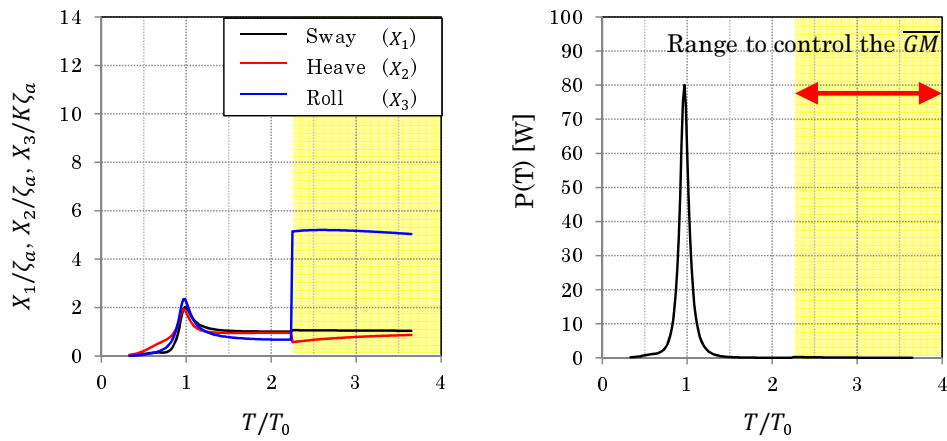
\overline{GM} を制御する事によって, 結果的に仕事率がマイナスに作用してしまう事が確認された. しかし, Roll や Sway の応答を大きくすることに対してはプラスに作用していることから, \overline{GM} を制御する周期の範囲を適切に選べば, 仕事率を向上させることが出来ると期待できる. そこで, \overline{GM} を変化させる周期の範囲をパラメトリックに変化させることで, 仕事率が向上する範囲は無いか模索した. この結果を Fig.5.16 から Fig.5.18 に示す. また, これによって変化する評価値 (EV_4) をまとめた結果を Fig.5.19 に示す.

まず Fig.5.16 から Fig.5.18 の RAO を見ると, \overline{GM} を変化させた範囲では, 全体的に Roll と Sway の変化が顕著で, Roll の応答は大きくなり, Heave は小さくなる. これに対して, 仕事率に目立った変化が現れるのは, \overline{GM} を変化させる範囲を $(1.20 < T/T_0)$ としたあたりからで, $(0.50 < T/T_0)$ では明らかに仕事率は小さくなっている.

(a) RAO and power in the state of changing the \overline{GM} ($2.50 < T/T_0$)



(b) RAO and power in the state of changing the \overline{GM} ($2.25 < T/T_0$)



(c) RAO and power in the state of changing the \overline{GM} ($2.00 < T/T_0$)

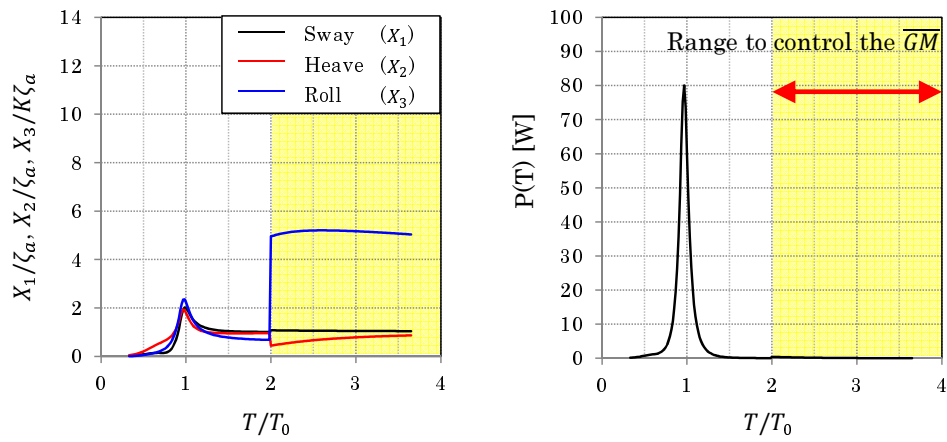
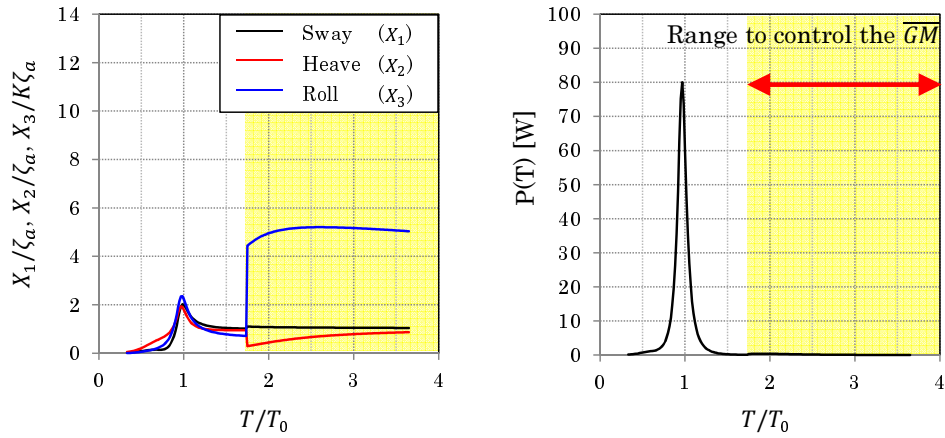
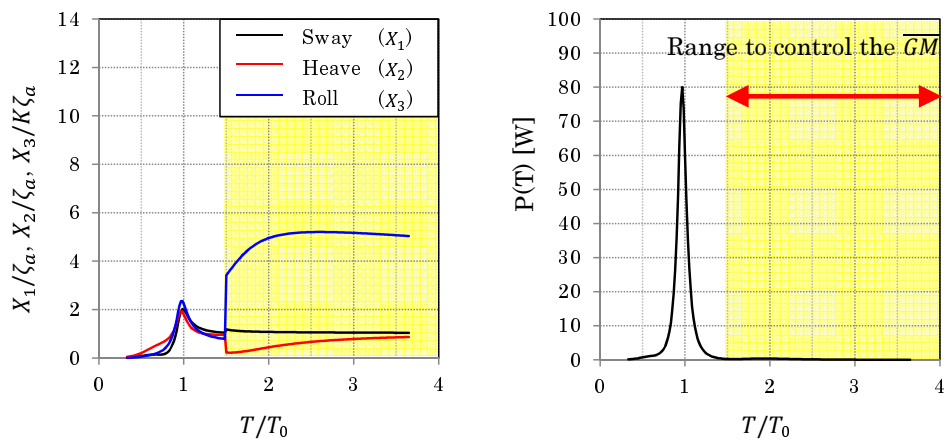


Fig. 5.16: RAO and power in the state of changing the \overline{GM} -1-

(a) RAO and power in the state of changing the \overline{GM} ($1.75 < T/T_0$)



(b) RAO and power in the state of changing the \overline{GM} ($1.50 < T/T_0$)



(c) RAO and power in the state of changing the \overline{GM} ($1.25 < T/T_0$)

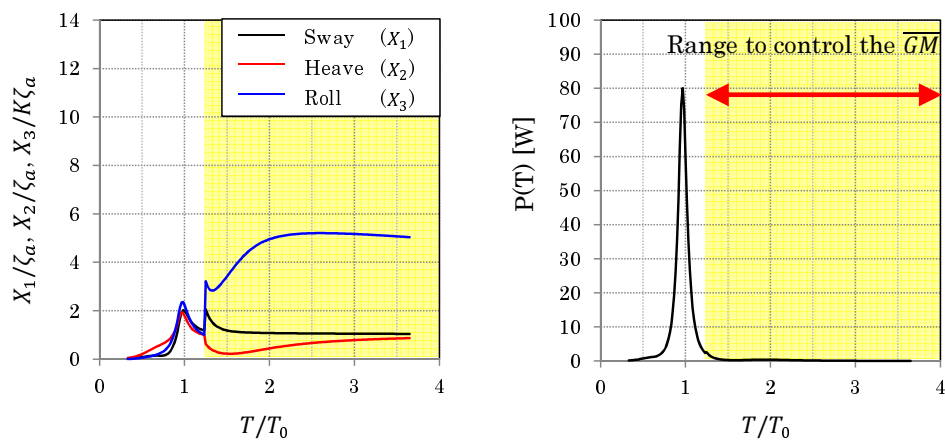
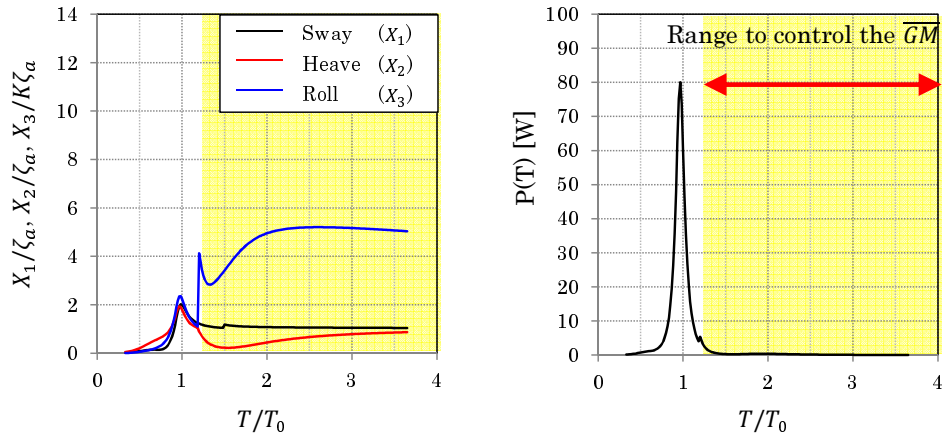
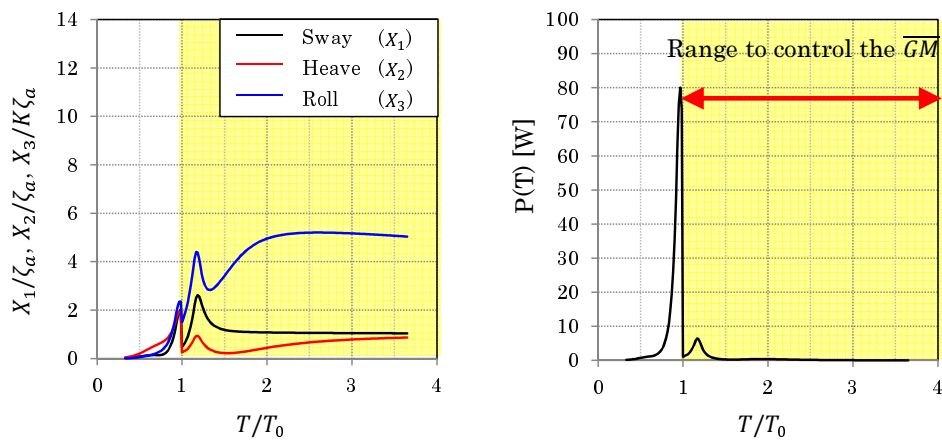


Fig. 5.17: RAO and power in the state of changing the \overline{GM} -2-

(a) RAO and power in the state of changing the \overline{GM} ($1.20 < T/T_0$)



(b) RAO and power in the state of changing the \overline{GM} ($1.00 < T/T_0$)



(c) RAO and power in the state of changing the \overline{GM} ($0.75 < T/T_0$)

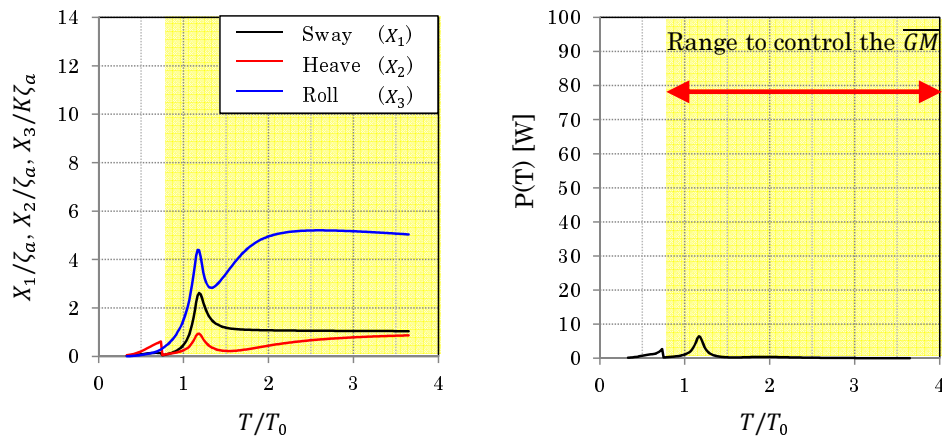


Fig. 5.18: RAO and power in the state of changing the \overline{GM} -3-

次に Fig.5.19 より評価値 (EV_4) の変化を確認する.

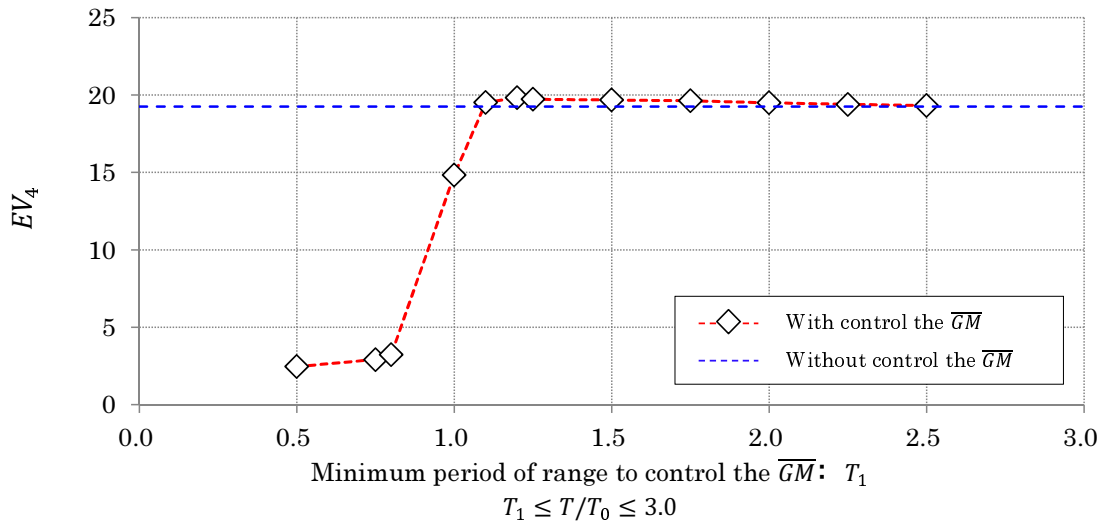


Fig. 5.19: The changes of evaluation value in case of changing the range of the period of changing the \overline{GM} .

図中に \overline{GM} 制御していない場合での評価値を破線で示しており, $T/T_0 \leq 1$ の範囲ではこれよりも低い. しかし, 若干ではあるが, $T/T_0 > 1$ では, \overline{GM} 制御したことによる効果により評価値が高くなっていることが確認できる. ここに示した中で最も評価値が高いのは, \overline{GM} を変化させる周期を ($1.20 < T/T_0$) としたときであるが, この時の RAO と P(T) を確認する (Fig.5.18(a)). まず, RAO を見ると \overline{GM} を変化させ始める周期 $T/T_0 = 1.20$ で Sway は小さくなり始め, Roll はピークのようなものが確認できる. 仕事率を見ると, $T/T_0 = 1.20$ に小さな棘のようなものがあるのが見えるが, これが評価値にを向上させる原因である.

以上の結果より, \overline{GM} 制御を想定することによる最適形状を探索する際には, \overline{GM} を変化させる周期を ($1.20 < T/T_0$) とする.

5.3 \overline{GM} 制御による同調運動と最適形状の変化

\overline{GM} 制御することを想定して最適形状を探索する場合での計算の流れを以下に示す。また、フロー図を Fig.5.20 に示す。

それぞれの項目について、計算の流れに沿って簡単に説明する。

- 1 初期の浮体形状は、ランダム関数等を用いて初期形状の設計変数により設定
- 2 流体力係数は、線形ポテンシャル理論に基づき⁴²⁾ 算定
- 3 波周期に合わせて適切な \overline{GM} を推定
- 4 浮体の応答振幅は、浮体を剛体と見なした運動方程式と 2 の流体力係数を連成させ導出
- 5 形状の評価値は、波エネルギー吸収機構の吸収量など (3.1 節) で算出
- 6 最も評価値の高い形状への収束を判定。収束していなければ 7 へ。収束が判定されれば 8 へ進む
- 7 GA での交叉や突然変異の考え³⁹⁾ に基づいて浮体形状の再設定
- 8 最高評価値を得た形状をその評価方法や条件下での最適形状とする

波周期に合わせて Roll の固有周期を変化させるためには、事前に波周期と \overline{GM} の関係を把握する必要があるが、この作業は運動方程式を解く前の「3. 波周期に合わせて適切な \overline{GM} を推定」で行う。ここでは、適当に定めた \overline{GM} における Roll の固有周期を確認する作業を複数回繰り返すことで、 \overline{GM} と Roll の固有周期の関係を求める。

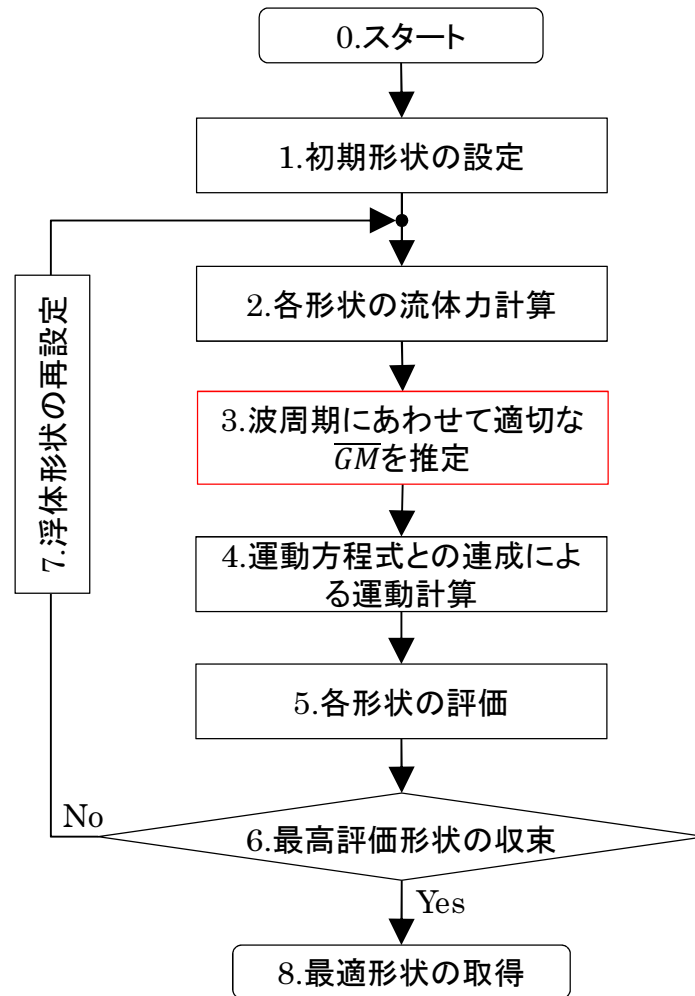


Fig. 5.20: Flow chart of the calculation in case of considering to control \overline{GM} .

ところで，Heave，Rollとの連成成分を無視した場合における Roll の固有周期と \overline{GM} の関係は，一般的な浮体の運動方程式より (5.1) 式のように表す事ができる．ただし， I_{33} および A_{33} は Roll 方向の慣性モーメントおよび付加慣性モーメント． W は浮体重量である．

$$T_{Roll} = 2\pi \sqrt{\frac{(I_{33} + A_{33})}{W \cdot \overline{GM}}} = \frac{\alpha}{\sqrt{\overline{GM}}} \quad (5.1)$$

第3式の α は，第2式の \overline{GM} 以外を定数と仮定して，まとめたものである． A_{33} は波周期に応じて変化するが，この α をうまく推定することが出来れば，任意の波周期における \overline{GM} を算出することが容易となる．ある形状の \overline{GM} と Roll の固

有周期の関係を Fig.5.21 に示す.

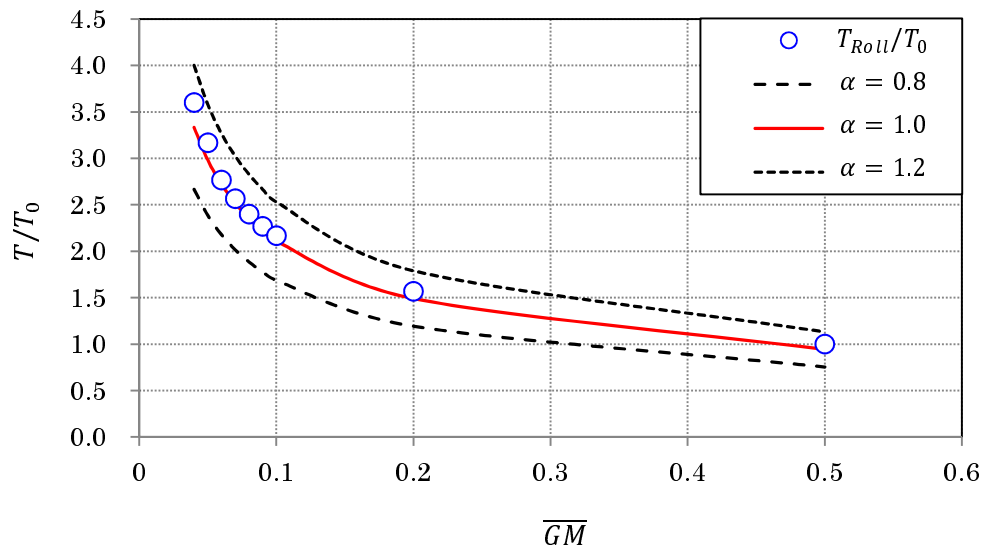


Fig. 5.21: Simple Estimation of \overline{GM} .

Fig.5.21 の T_{Roll}/T_0 は \overline{GM} をパラメトリックに変化させながら, Roll の固有周期を読み取ったものである. ここに, (5.1) 式より \overline{GM} から Roll の固有周期を推定した結果 ($\alpha = 0.8, 1.0, 1.2$) を重ねて示している. ここに示した例の中では, $\alpha = 1.0$ で推定した固有周期が最も近い. $T/T_0 > 3.0$ の範囲で若干ずれているように見えるが, その他の範囲では大凡よく推定できているため, この場合は $\alpha = 1.0$ が最適値であると判断する. また, エネルギー吸収する事を考慮すると, 長周期域よりも短周期域で正確な周期を推定する事が重要であるため, $T/T_0 > 3.0$ におけるこの程度のずれは考慮しないものとする. 実際の計算では任意の \overline{GM} で Roll の固有周期を読み取り, 最小二乗法によって最適な α を決定した.

Table 5.2 に浮体運動と GA の計算に必要な諸パラメータを示す．本稿では没水部の断面積 S が一定となるように調節して形状比較を行った． \overline{GM} と慣動半径 κ は没水部の断面積 S の平方根との比で与えた．これらは前述の水槽実験で用いた浮体を参考にして設定した．なお，エネルギー吸収機構の固有周期を同調させる際には，振子の腕の長さを変化させて行うものとした．

Table 5.2: Calculation conditions to consider the \overline{GM} control.

Parameters related to floating body	Value
Number of the floating body	1
S [m^2]	1
\overline{GM}/\sqrt{S}	0.22
κ/\sqrt{S}	1.58
Mesh number	100
Parameters related to evaluation	Value
m_p/M [%] (m_p :mass of the pendulum, M :mass of the floating body mass)	3.0
l_0/\sqrt{S} [%] (l_0 :The height of the pillar)	1.0
r_0/\sqrt{S} [%] (r_0 :The length of the pendulum arm)	Variable
Minimum period T_a ($= T/T_0$)	0.5
Maximum period T_b ($= T/T_0$)	3.0
Parameters related to GA	Value
Number of bodies per generation	300
Number of generation	20
Number of duplicates [%]	3.0
Number of design variables per a body	6
Crossover occurrence rate[%]	50.0
Mutation occurrence rate[%]	10.0

これより、 \overline{GM} 制御を想定した最適形状について検討した結果について述べるが、形状の評価は 3.1 節で述べた「エネルギー吸収量で評価する」方法とする。従って、 \overline{GM} 制御を想定した最適形状と比較するのは、同じ評価方法で最適形状となった Body "D₁" とする。

Fig.5.22 に形状探索した結果を示す。ただし、 \overline{GM} 制御を想定した最適形状を Body "E₁" とする。

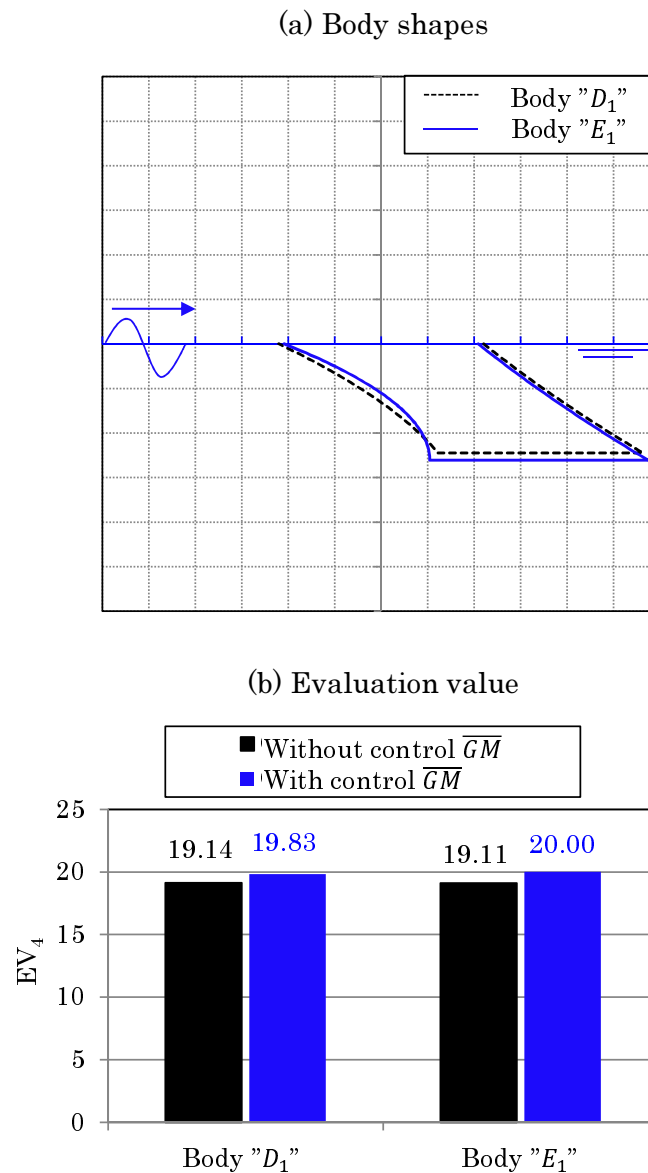


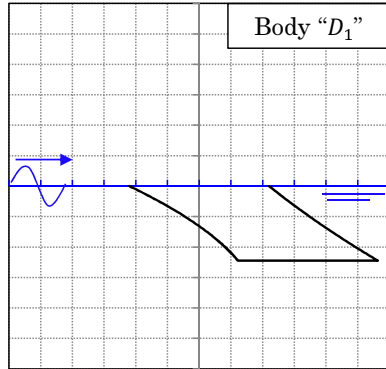
Fig. 5.22: Comparison of body D_1 and body E_1 .

Fig.5.22 (a) より D_1 と E_1 の形状の違いを比較すると、波下側と波上側の側面形状とも、水深方向に対して波下側に向かって伸びていくような形状的特徴が共通しており、水線長も大凡等しい。全体的に良く似ている形状であるが、異なる形状が最適解となった。

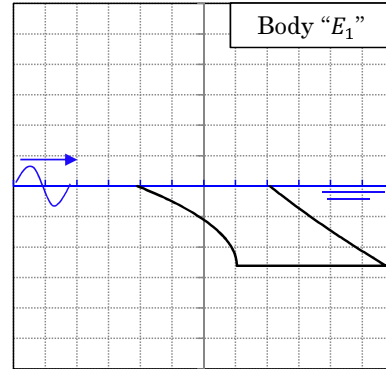
また、Fig.5.22 (b) より \overline{GM} 制御する場合と、制御しない場合での評価値 (EV_4) がどの程度変化するのか確認する。評価値を読み取ると、 \overline{GM} を制御していない Body” D_1 ”は 19.14, Body” E_1 ”は 19.11 と僅差であるが Body” D_1 ”の方が評価が高い。 \overline{GM} を制御した場合には、Body” D_1 ”は 19.83, Body” E_1 ”は 20.09 と評価が逆転したことがわかる。この結果より、 \overline{GM} 制御することを想定した最適形状 E_1 は、制御しないときの最適形状 Body” D_1 ”によく似ているが異なっていることから、Body” E_1 ”は” D_1 ”よりも「 \overline{GM} 制御することで揺れを大きくする」といったコンセプトに適しているといえる。しかしながら、その差は僅差であるため決定的な差があったとはいえない。

Fig.5.23 と Fig.5.24 に形状 D_1 と形状 E_1 の \overline{GM} を制御した場合と、制御していない場合での周波数応答振幅と仕事率をそれぞれ示す。

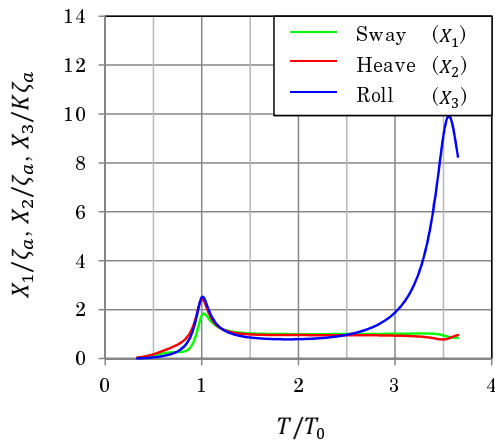
(a-1) Body shape $\cdot D_1$



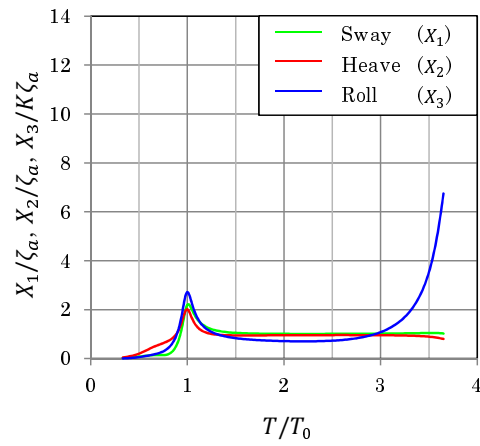
(a-2) Body shape $\cdot E_1$



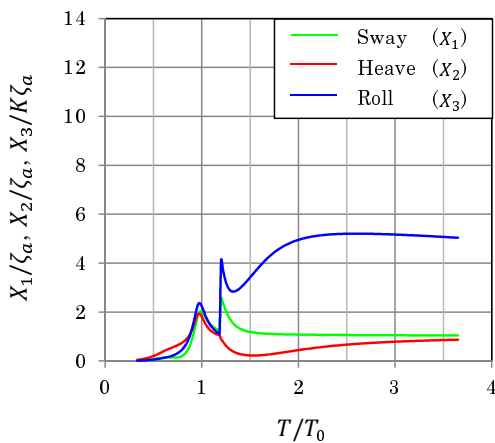
(b-1) RAO in case of without control $\overline{GM} \cdot D_1$



(b-2) RAO in case of without control $\overline{GM} \cdot E_1$



(c-1) RAO in case of with control $\overline{GM} \cdot D_1$



(c-2) RAO in case of with control $\overline{GM} \cdot E_1$

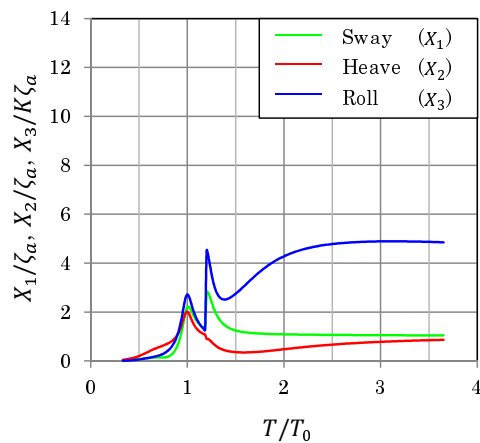
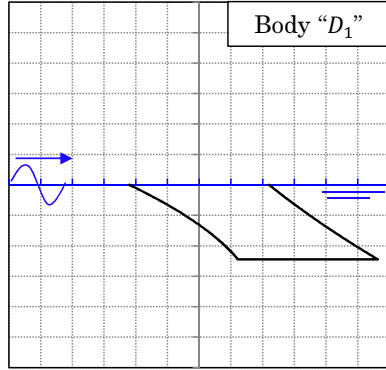
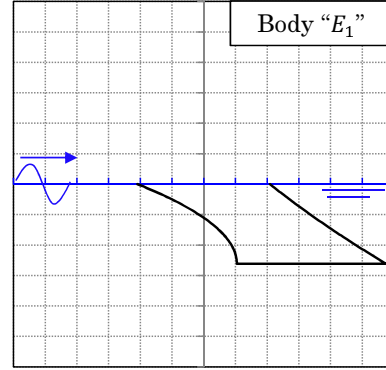


Fig. 5.23: Changes of RAO in case with or without controlled $\overline{GM}(D_1$ and $E_1)$.

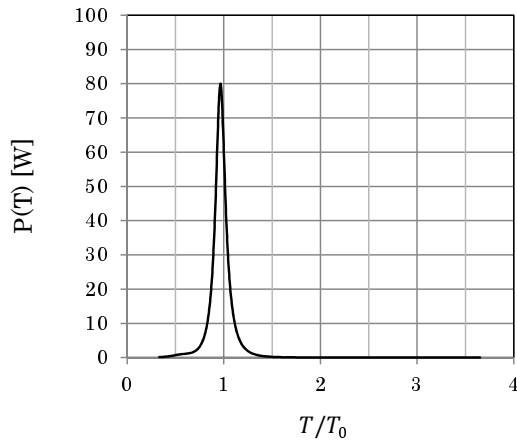
(a-1) Body shape $\cdot D_1 \cdot$



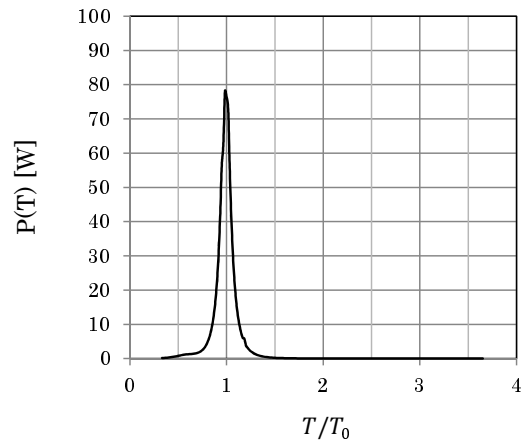
(a-2) Body shape $\cdot E_1 \cdot$



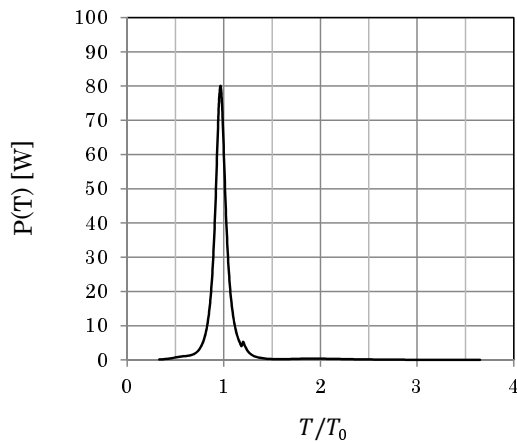
(b-1) Power in case of without control $\overline{GM} \cdot D_1 \cdot$



(b-2) Power in case of without control $\overline{GM} \cdot E_1 \cdot$



(c-1) Power in case of with control $\overline{GM} \cdot D_1 \cdot$



(c-2) Power in case of with control $\overline{GM} \cdot E_1 \cdot$

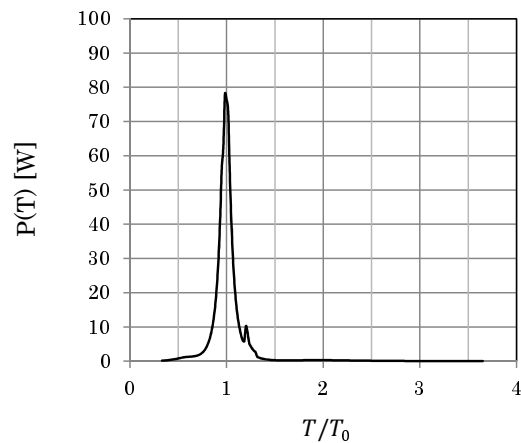


Fig. 5.24: Changes of Power in case with or without controlled $\overline{GM}(D_1$ and $E_1)$.

これまで、発電機構の仕事率を大きくすることを目的として、Rollの固有周期を波周期に合わせる方法を検討したが、今度は発電機構の固有周期を波周期に合わせて制御することを考える。Body” D_1 ”を例として、発電機構の固有周期を制御した場合と制御していない場合での仕事率を比較した結果を Fig.5.25 に示す。

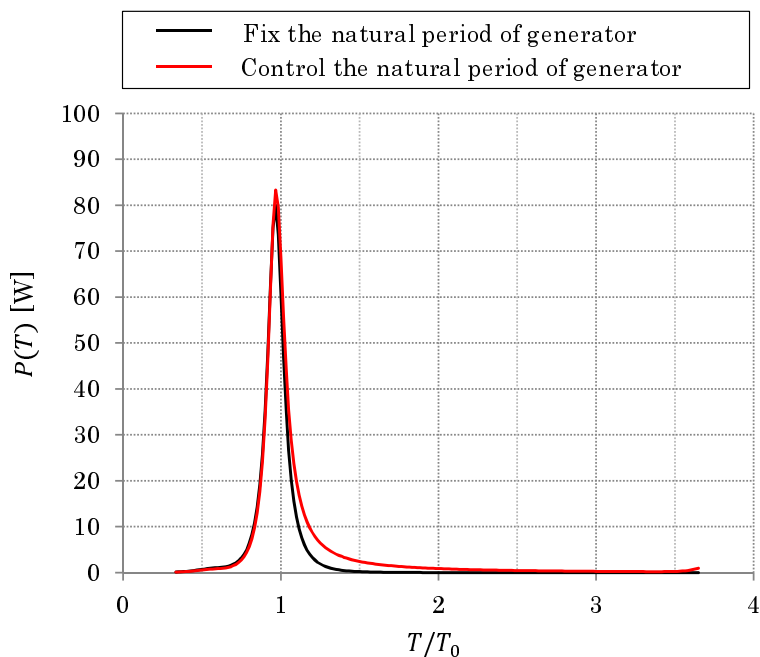


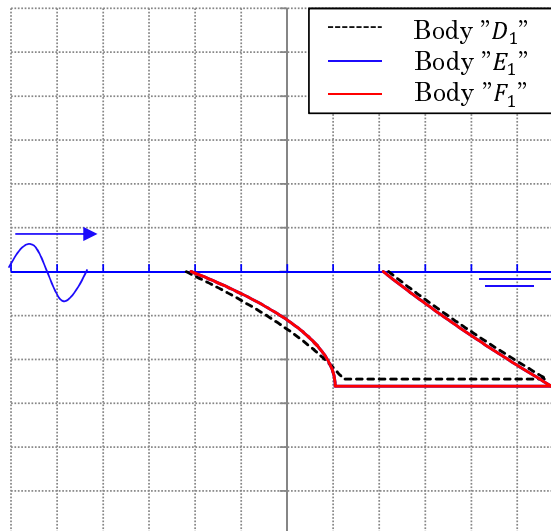
Fig. 5.25: Changes in power in case of changing the natural period of the generator.

Fig.5.25 をみると、発電機構の固有周期を制御した場合では、制御していない場合と比較して、全体的に仕事率が大きくなっているが、特に $1.0 < T/T_0 < 2.0$ の範囲では差が顕著に現れる。この結果を元に評価値 (EV_4) を計算すると、発電機構の固有周期を変化させない場合で 19.14、変化させた場合では 24.94 となり、大きく向上することが確認された。

想定する発電機構が浮体運動に大きな影響を与えてしまう場合には注意が必要となるが、本研究では、浮体運動に与える影響が小さいものを想定している。発電機構の固有周期を波周期に合わせて変化させることは仕事率を向上させるには非常に有効である。そこで、今度は、発電機構の固有周期を波周期に合わせて制御することを考える。Fig.5.26 にこの結果を示す。

Fig.5.26 では、新たに得られた最適形状を F_1 としており、 \overline{GM} を制御した場合での最適形状 Body " E_1 " も比較のため重ねて示している。しかし、 \overline{GM} を制御せず、発電機構の固有周期のみを制御した場合での最適形状 Body " F_1 " は " E_1 " と全く同じ形状となった。

(a) Body shapes



(b) Evaluation value

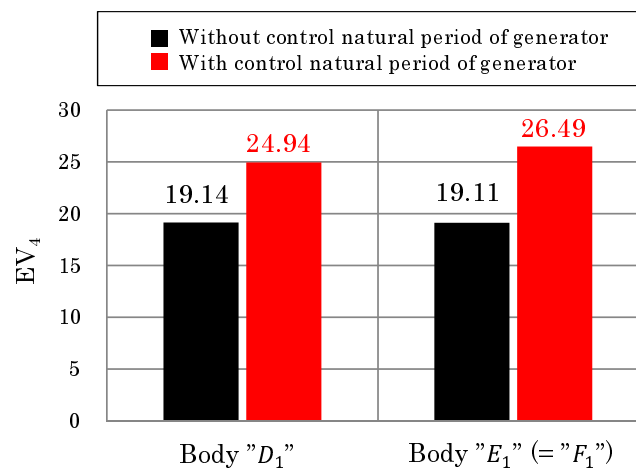


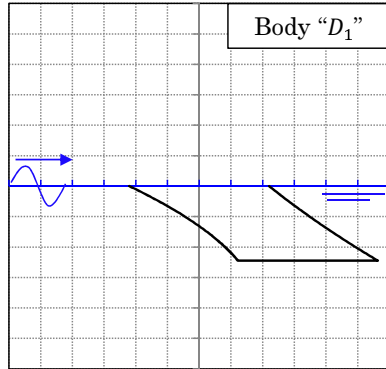
Fig. 5.26: Comparison of body D_1 , E_1 and F_1 .

Fig.5.26(b) より、評価値を比較する。発電機構の固有周期を制御していない Body " D_1 " は 19.14、Body " F_1 " は 19.11 と僅差であるが Body " D_1 " の方が評価が高い。発電機構の固有周期を制御した場合には、Body " D_1 " は 24.94、Body " F_1 " は 26.49 と評価が逆転したことがわかる。この結果より、発電機構の固有周期を制御することを想定した最適形状 Body " F_1 " (" $= E_1$ ") は、制御しないときの最適形状

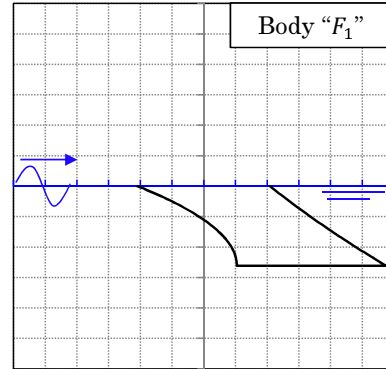
Body” D_1 ”によく似ているが異なっていることから、Body” F_1 ”は” D_1 ”よりも「発電機構の固有周期を制御することで揺れを大きくする」といったコンセプトに適しているといえる。

Fig.5.27 と Fig.5.28 に Body” D_1 ”と” F_1 ”の発電機構の固有周期を変化させた場合と変化させない場合での周波数応答振幅と仕事率をそれぞれ示す。

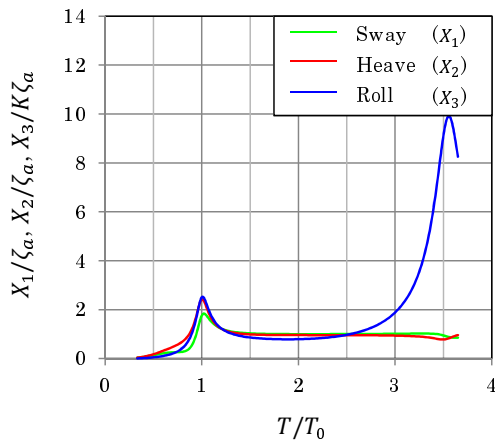
(a-1) Body shape $\cdot D_1 \cdot$



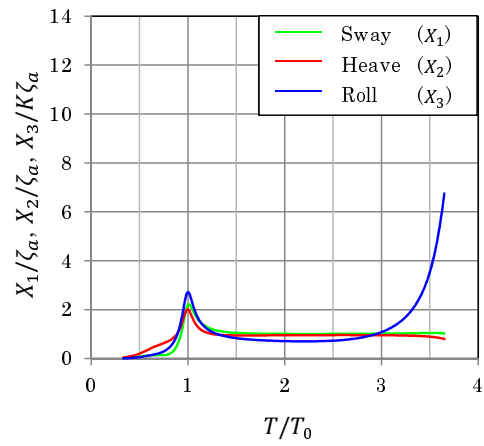
(a-2) Body shape $\cdot F_1 \cdot$



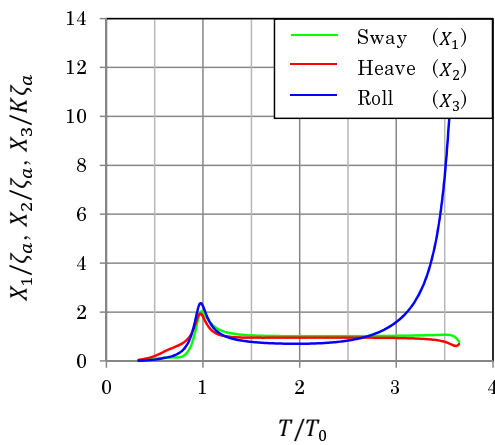
(b-1) RAO in case of without control $\overline{GM} \cdot D_1 \cdot$



(b-2) RAO in case of without control $\overline{GM} \cdot F_1 \cdot$



(c-1) RAO in case of with control $\overline{GM} \cdot D_1 \cdot$



(c-2) RAO in case of with control $\overline{GM} \cdot F_1 \cdot$

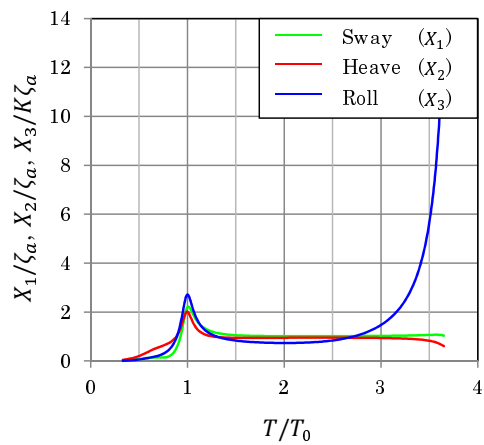
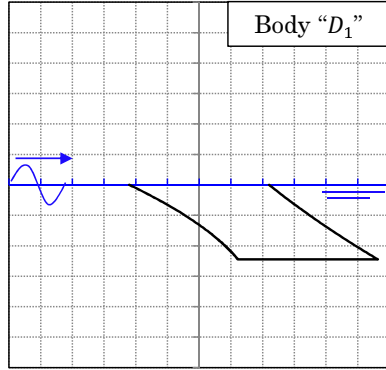
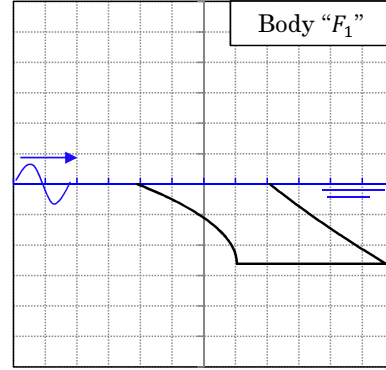


Fig. 5.27: Changes of RAO in case with or without controlled \overline{GM} (D1 and F1).

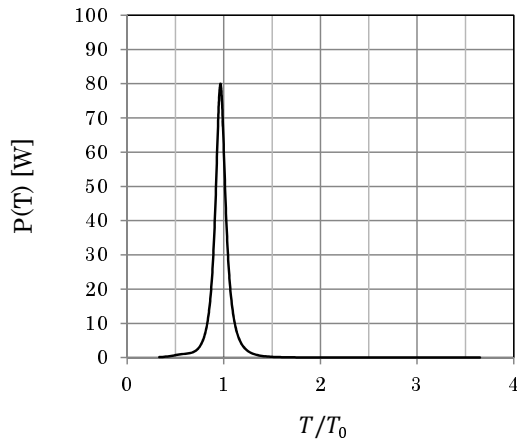
(a-1) Body shape $\cdot D_1 \cdot$



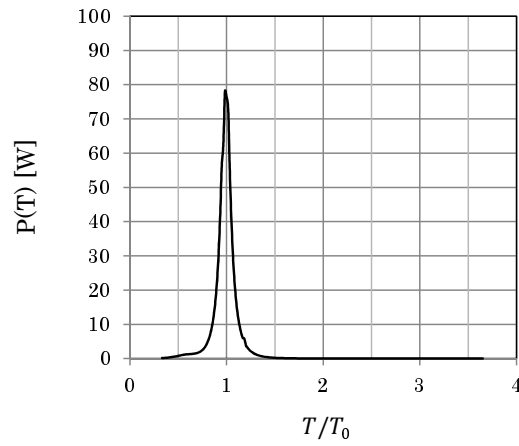
(a-2) Body shape $\cdot F_1 \cdot$



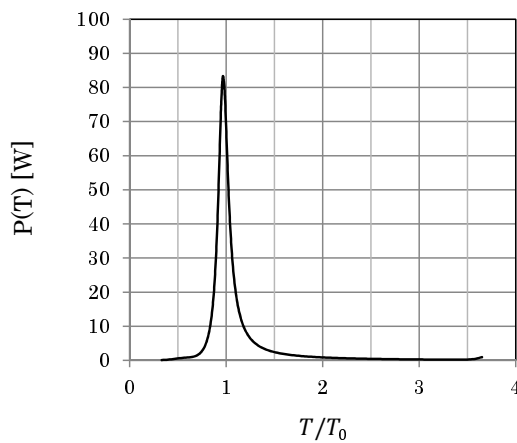
(b-1) Power in case of without control $\overline{GM} \cdot D_1 \cdot$



(b-2) Power in case of without control $\overline{GM} \cdot F_1 \cdot$



(c-1) Power in case of with control $\overline{GM} \cdot D_1 \cdot$



(c-2) Power in case of with control $\overline{GM} \cdot F_1 \cdot$

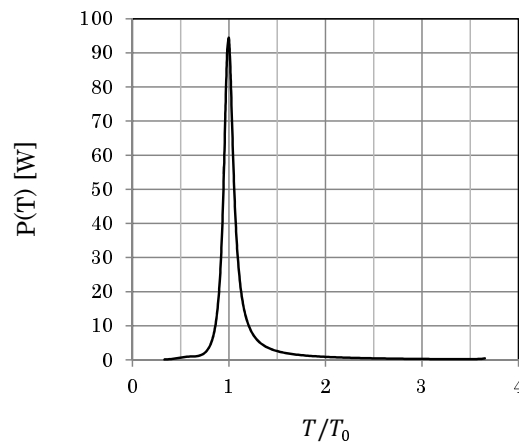


Fig. 5.28: Changes of Power in case with or without controlled \overline{GM} (D1 and F1).

最後に、 \overline{GM} と発電機構の固有周期を波周期に合わせて制御することを考える。Fig.5.29 にこの結果を示す。ただし、新たに得られた最適形状を Body "G₁" とする。Fig.5.29(a) より "D₁" と "G₁" を比較すると、"D₁" と "E₁" を比較したときと同じように、波下側と波上側の側面形状とも、水深方向に対して波下側に向かって伸びていくような大まかに捉えた形状的特徴は共通しているが、水線長が短くなるなど、比較的变化が大きいように見える。Body "D₁" と "G₁" は \overline{GM} と発電機構の固有周期を変化させた場合と変化させない場合で評価値 (EV₄) がどの程度変化するか確認する。ただし、Body "D₁" と "G₁" の他に、参考のため Body "E₁" ("= F₁") も重ねて示している。

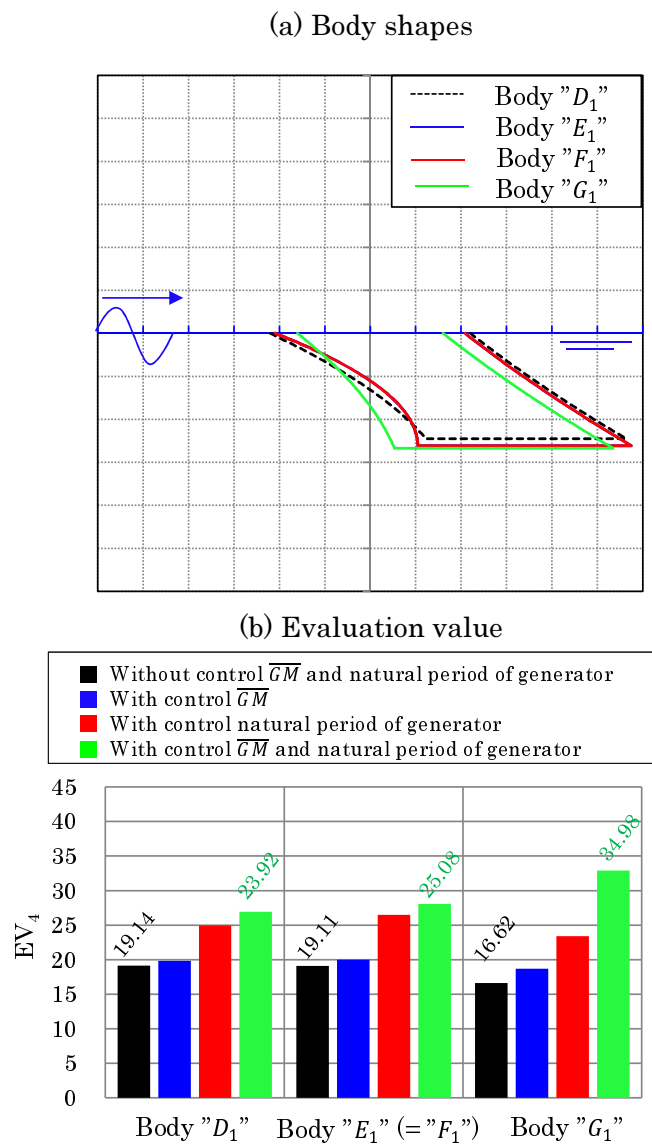
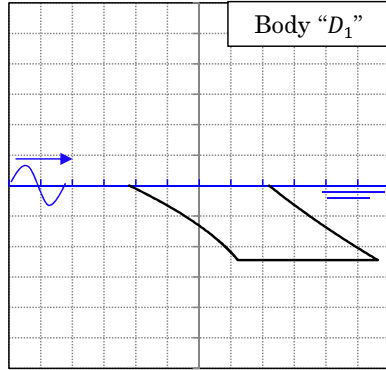


Fig. 5.29: Comparison of body D₁, E₁(= F₁) and G₁.

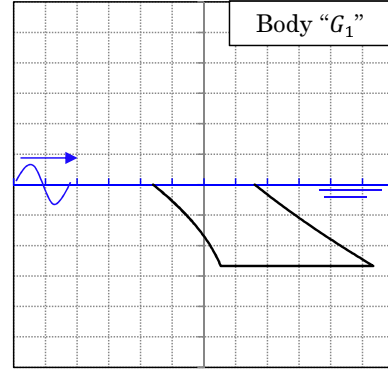
Fig.5.26(b) より，評価値を比較する． \overline{GM} と発電機構の固有周期を制御していない Body” D_1 ”は 19.14，Body” G_1 ”は 16.62 と比較的低い評価である． \overline{GM} と発電機構の固有周期を制御した場合には，Body” D_1 ”は 23.92，” G_1 ”は 34.98 と評価が逆転したことがわかる．この結果より， \overline{GM} と発電機構の固有周期を制御することを想定した最適形状 Body” G_1 ”は，制御しないときの最適形状” D_1 ”よりも「 \overline{GM} と発電機構の固有周期を制御することで揺れを大きくする」といったコンセプトに適しているといえる．

Fig.5.30 と Fig.5.31 に Body” D_1 ”と” G_1 ”の発電機構の固有周期を変化させた場合と変化させない場合での周波数応答振幅と仕事率をそれぞれ示す．

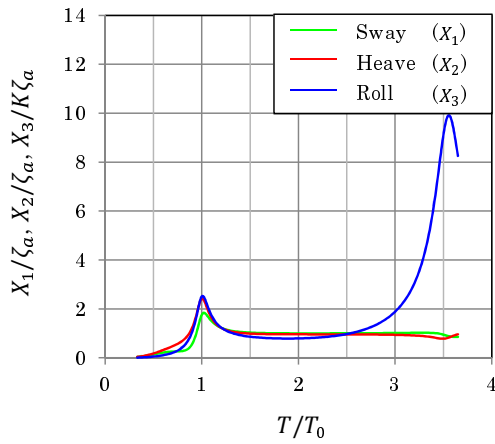
(a-1) Body shape $\cdot D_1 \cdot$



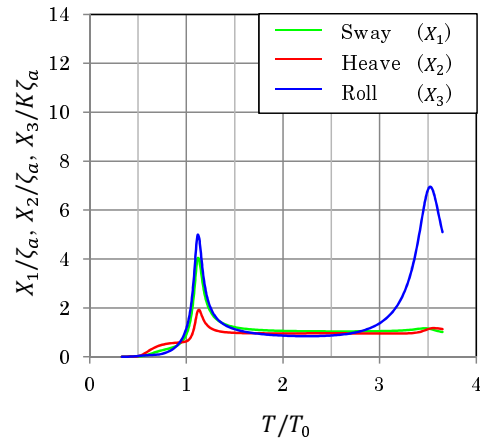
(a-2) Body shape $\cdot G_1 \cdot$



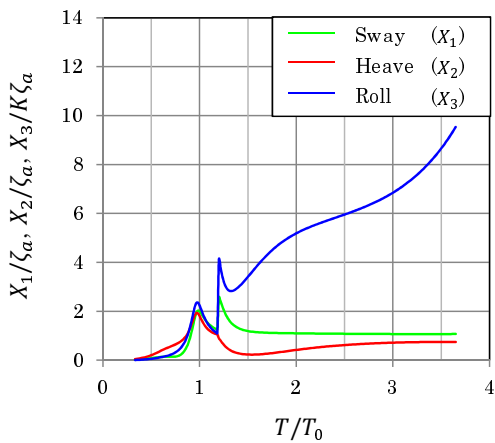
(b-1) RAO in case of without control $\overline{GM} \cdot D_1 \cdot$



(b-2) RAO in case of without control $\overline{GM} \cdot G_1 \cdot$



(c-1) RAO in case of with control $\overline{GM} \cdot D_1 \cdot$



(c-2) RAO in case of with control $\overline{GM} \cdot G_1 \cdot$

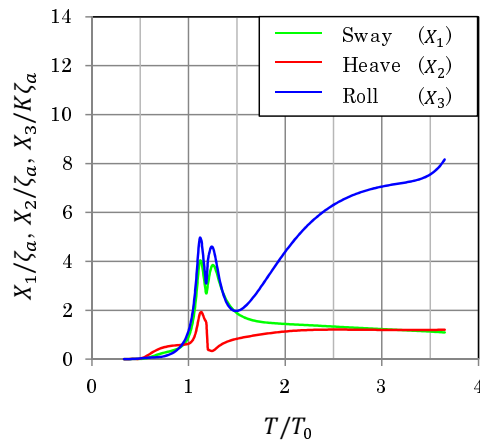
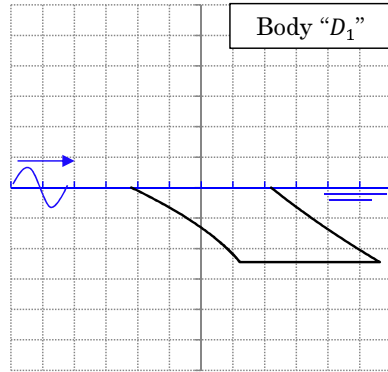
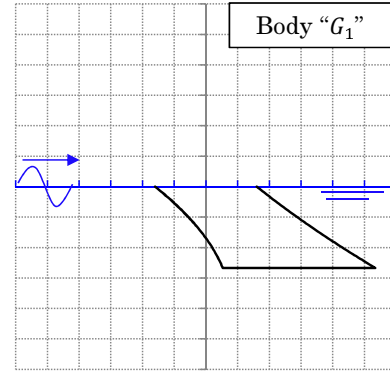


Fig. 5.30: Changes of RAO in case with or without controlled \overline{GM} (D1 and G1).

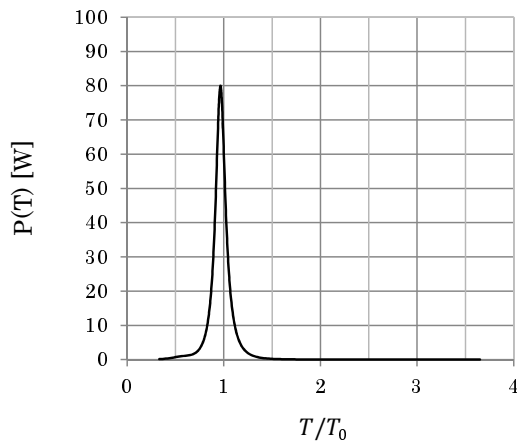
(a-1) Body shape $\cdot D_1 \cdot$



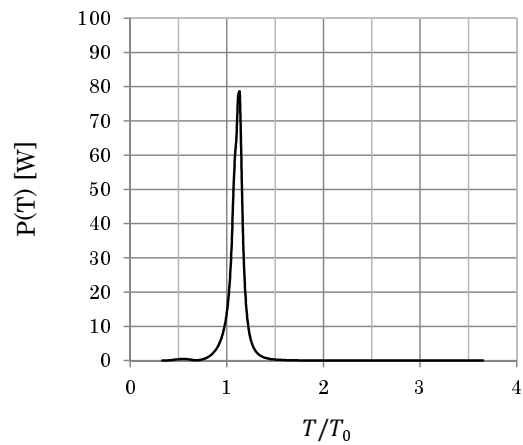
(a-2) Body shape $\cdot G_1 \cdot$



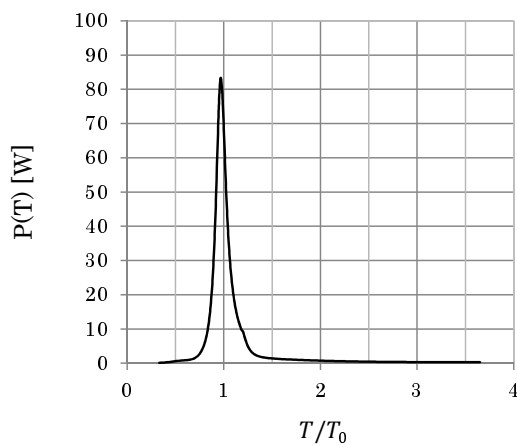
(b-1) Power in case of without control $\overline{GM} \cdot D_1 \cdot$



(b-2) Power in case of without control $\overline{GM} \cdot G_1 \cdot$



(c-1) Power in case of with control $\overline{GM} \cdot D_1 \cdot$



(c-2) Power in case of with control $\overline{GM} \cdot G_1 \cdot$

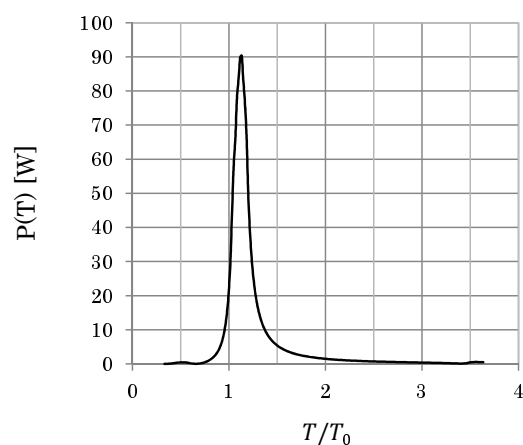
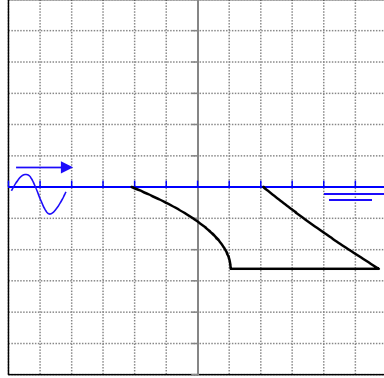


Fig. 5.31: Changes of Power in case with or without controlled \overline{GM} (D_1 and G_1).

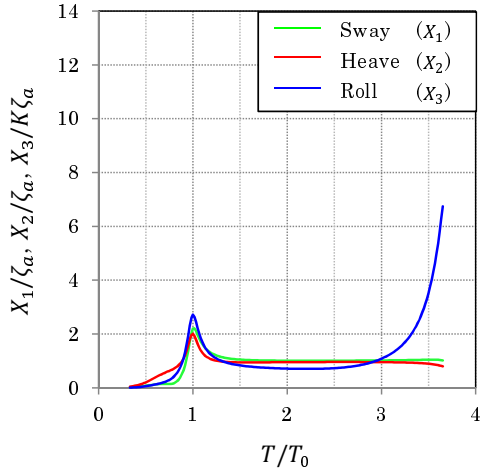
以上の結果をまとめると、 \overline{GM} を制御することを想定し、発電機構の固有周期を波周期に合わせて変化させることに適した最適形状 Body” G_1 ”は、搭載しないときの最適形状 Body” D_1 ”に対して形状的特徴は似ているが、水線長が短くなるなど、 \overline{GM} を制御する事を想定しただけの場合に対して比較的变化が大きいことがわかった。また、Body” G_1 ”は \overline{GM} と発電機構の固有周期を変化させた場合において最適形状となったが、 \overline{GM} のみを変化させた場合での形状探索では探索されなかったことから、 \overline{GM} のみを変化させるのではなく、発電機構の固有周期を変化させることを組み合わせて形状探索した方が、より優れた形状を探索出来ることが期待できる。

・GM制御することによる最適形状を検討した結果：最も評価値の高い形状 $E_1^{(1)}$

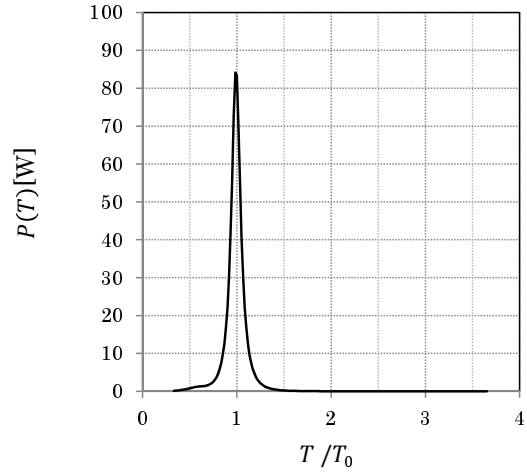
(a) Body shape $\cdot E_1^{(1)}$.



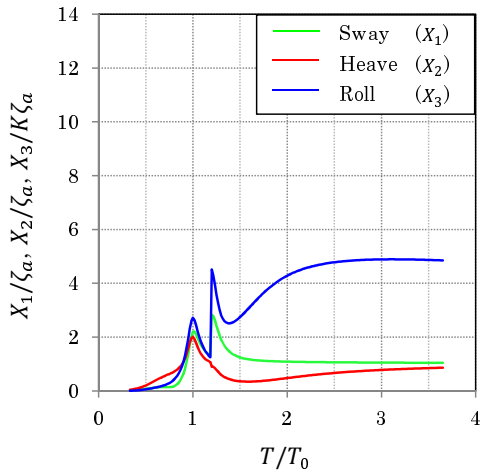
(b) RAO in case of without control $\overline{GM} \cdot E_1^{(1)}$.



(c) Power in case of without control $\overline{GM} \cdot E_1^{(1)}$.



(d) RAO in case of with control $\overline{GM} \cdot E_1^{(1)}$.



(e) Power in case of with control $\overline{GM} \cdot E_1^{(1)}$.

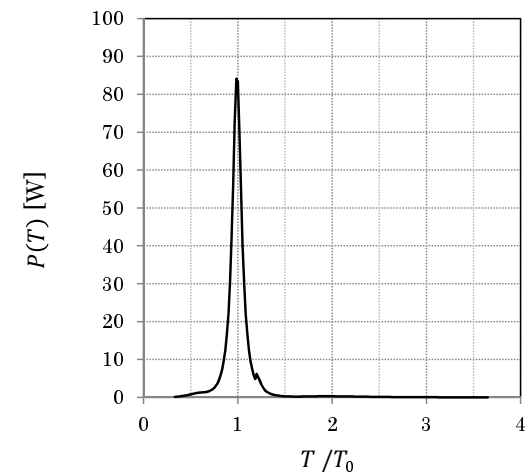
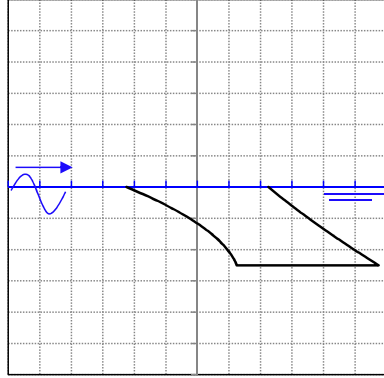


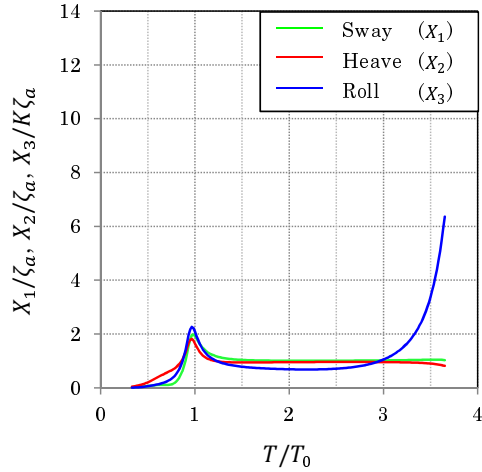
Fig. 5.32: Shape suitable for controlling the $\overline{GM} \cdot E_1^{(1)}$.

・GM制御することによる最適形状を検討した結果：最も評価値の高い形状 $E_1^{(2)}$

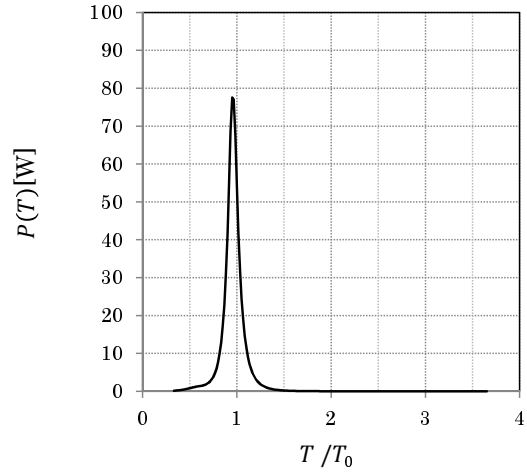
(a) Body shape $\cdot E_1^{(2)}$ -



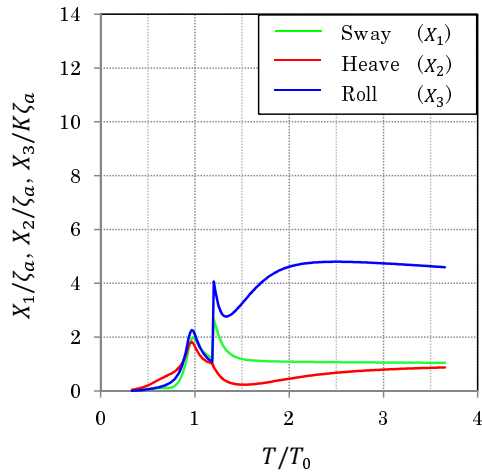
(b) RAO in case of without control $\overline{GM} \cdot E_1^{(2)}$ -



(c) Power in case of without control $\overline{GM} \cdot E_1^{(2)}$ -



(d) RAO in case of with control $\overline{GM} \cdot E_1^{(2)}$ -



(e) Power in case of with control $\overline{GM} \cdot E_1^{(2)}$ -

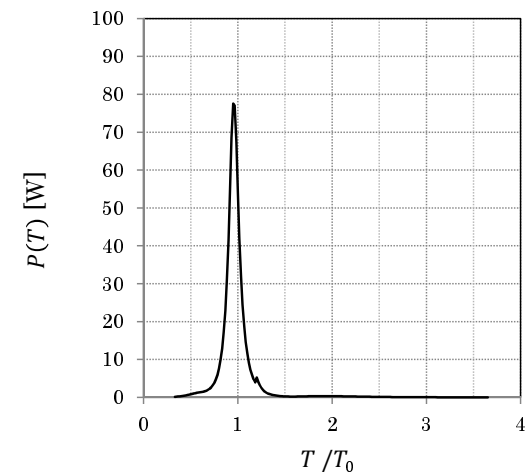
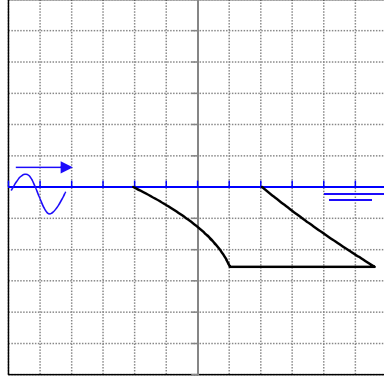


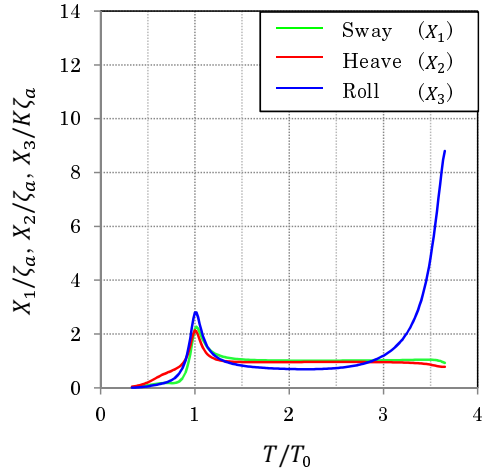
Fig. 5.33: Shape suitable for controlling the $\overline{GM} \cdot E_1^{(2)}$ -.

・GM制御することによる最適形状を検討した結果：最も評価値の高い形状 $E_1^{(3)}$

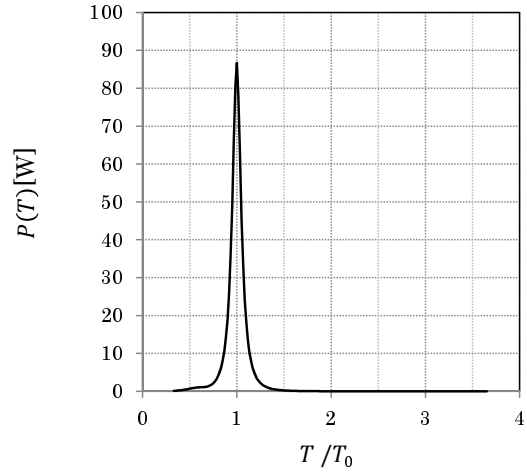
(a) Body shape $\cdot E_1^{(3)}$ -



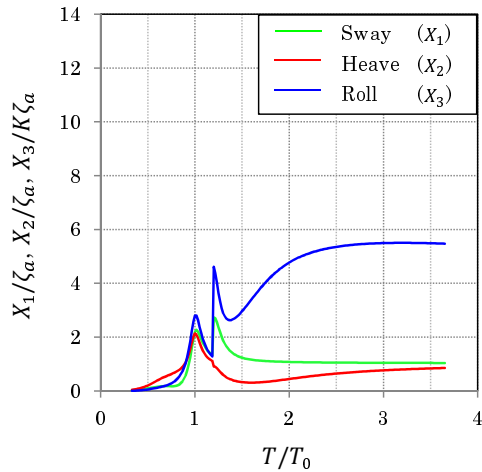
(b) RAO in case of without control $\overline{GM} \cdot E_1^{(3)}$ -



(c) Power in case of without control $\overline{GM} \cdot E_1^{(3)}$ -



(d) RAO in case of with control $\overline{GM} \cdot E_1^{(3)}$ -



(e) Power in case of with control $\overline{GM} \cdot E_1^{(3)}$ -

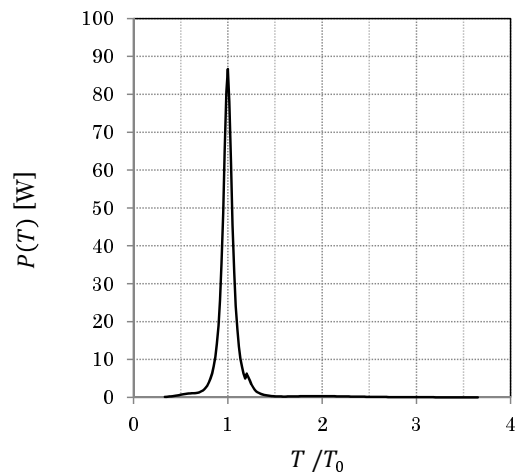
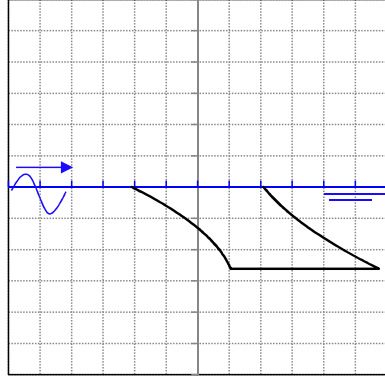


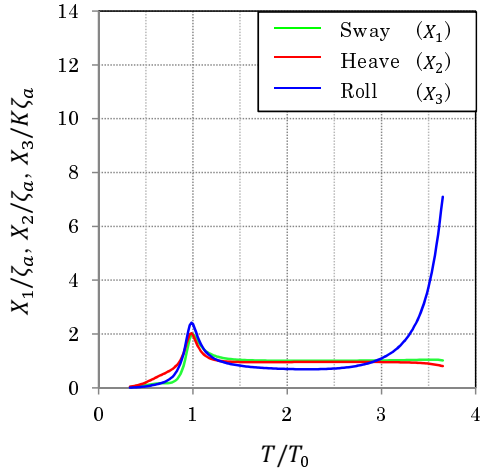
Fig. 5.34: Shape suitable for controlling the $\overline{GM} \cdot E_1^{(3)}$ -.

・GM制御することによる最適形状を検討した結果：最も評価値の高い形状 $E_1^{(4)}$

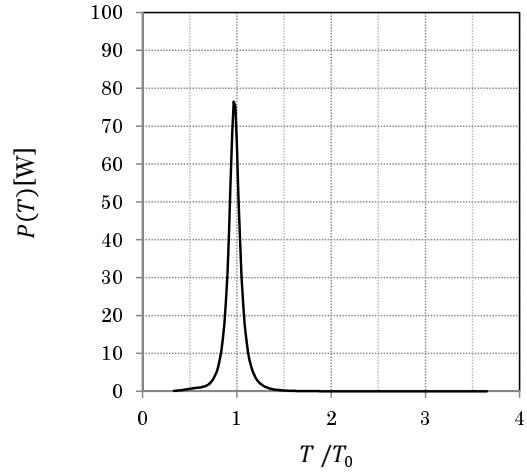
(a) Body shape $\cdot E_1^{(4)}$ -



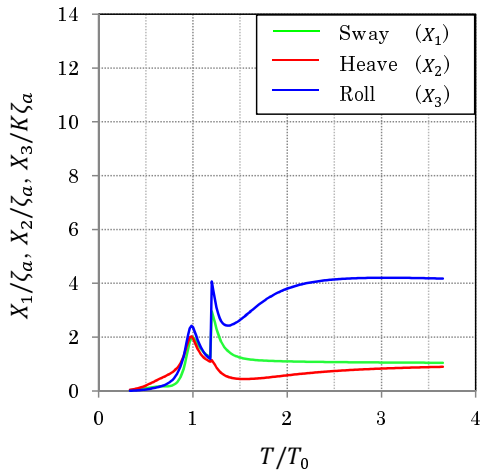
(b) RAO in case of without control $\overline{GM} \cdot E_1^{(4)}$ -



(c) Power in case of without control $\overline{GM} \cdot E_1^{(4)}$ -



(d) RAO in case of with control $\overline{GM} \cdot E_1^{(4)}$ -



(e) Power in case of with control $\overline{GM} \cdot E_1^{(4)}$ -

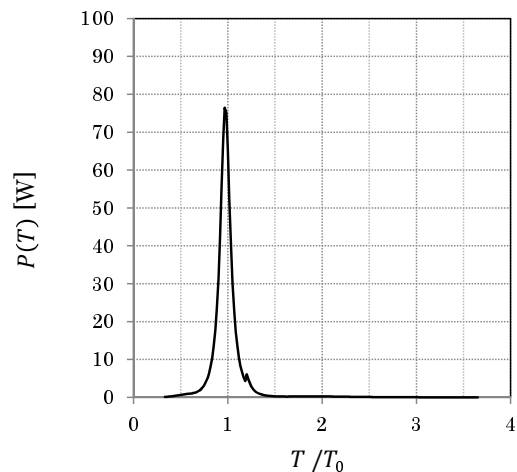
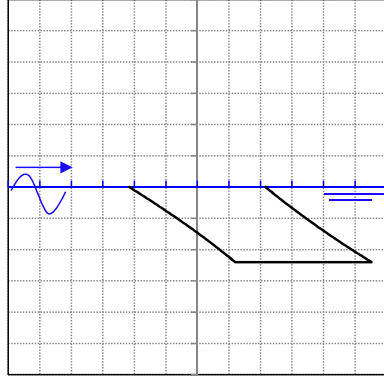


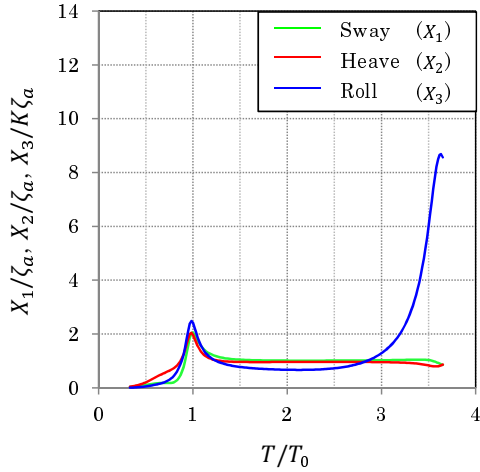
Fig. 5.35: Shape suitable for controlling the $\overline{GM} \cdot E_1^{(4)}$ -.

・GM制御することによる最適形状を検討した結果：最も評価値の高い形状 $E_1^{(5)}$

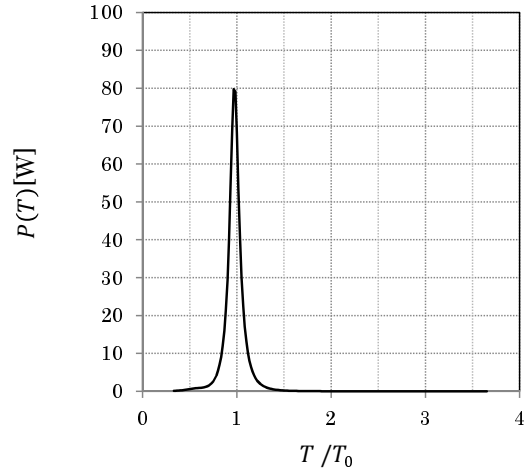
(a) Body shape $\cdot E_1^{(5)}$ -



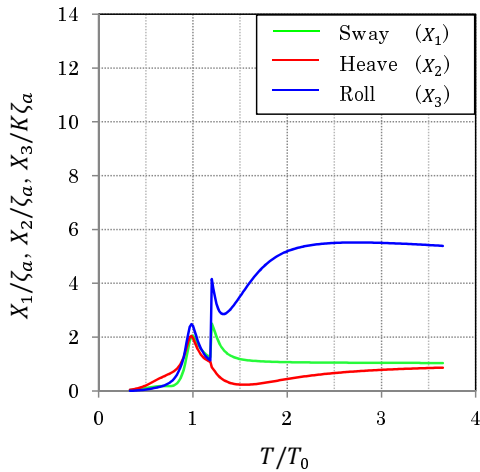
(b) RAO in case of without control $\overline{GM} \cdot E_1^{(5)}$ -



(c) Power in case of without control $\overline{GM} \cdot E_1^{(5)}$ -



(d) RAO in case of with control $\overline{GM} \cdot E_1^{(5)}$ -



(e) Power in case of with control $\overline{GM} \cdot E_1^{(5)}$ -

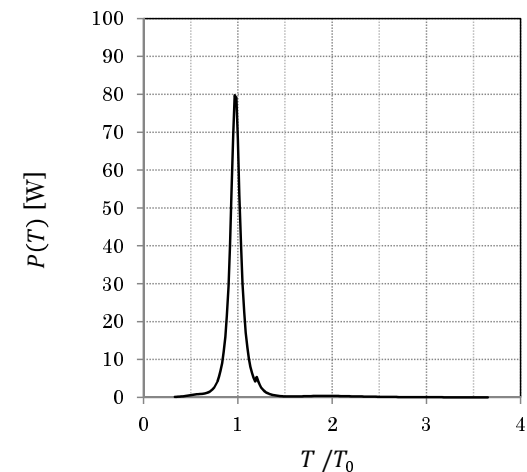
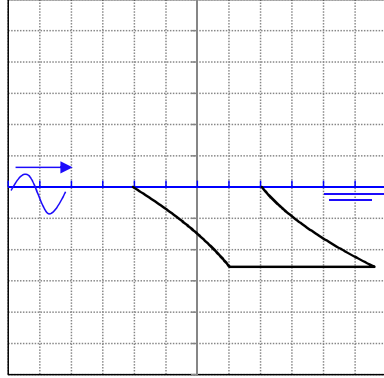


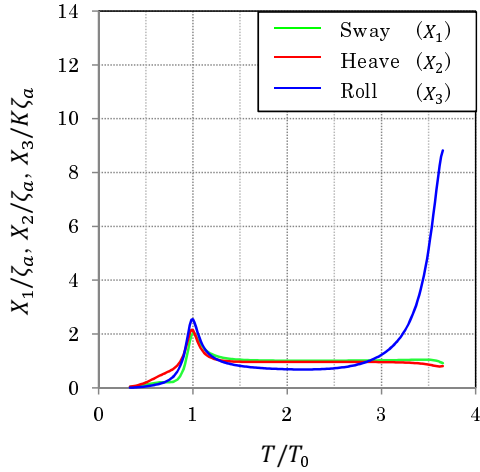
Fig. 5.36: Shape suitable for controlling the $\overline{GM} \cdot E_1^{(5)}$ -.

・GM制御することによる最適形状を検討した結果：最も評価値の高い形状 $E_1^{(6)}$

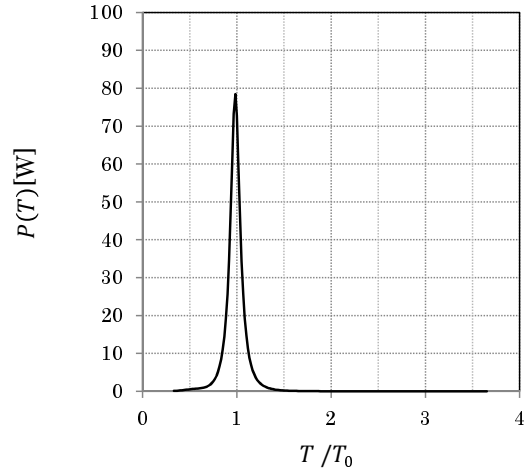
(a) Body shape $\cdot E_1^{(6)}$ -



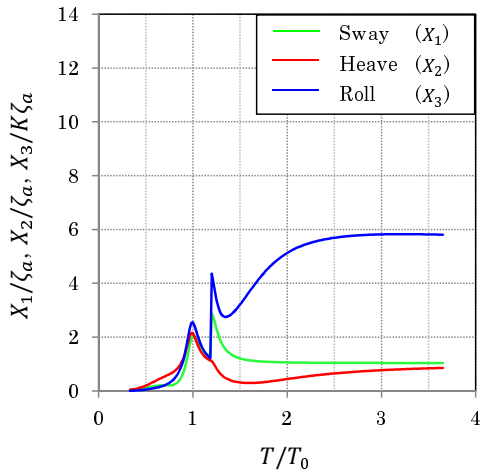
(b) RAO in case of without control $\overline{GM} \cdot E_1^{(6)}$ -



(c) Power in case of without control $\overline{GM} \cdot E_1^{(6)}$ -



(d) RAO in case of with control $\overline{GM} \cdot E_1^{(6)}$ -



(e) Power in case of with control $\overline{GM} \cdot E_1^{(6)}$ -

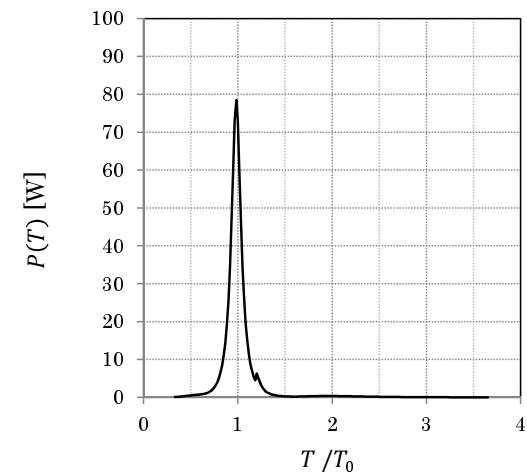
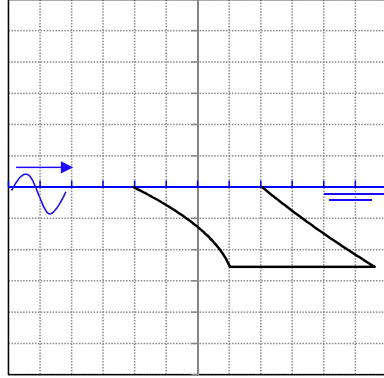


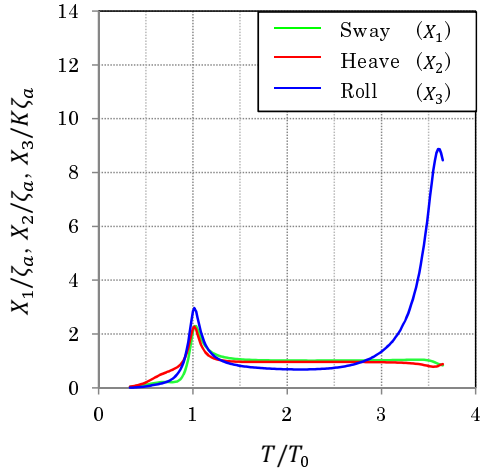
Fig. 5.37: Shape suitable for controlling the $\overline{GM} \cdot E_1^{(6)}$ -.

・GM制御することによる最適形状を検討した結果：最も評価値の高い形状 $E_1^{(7)}$

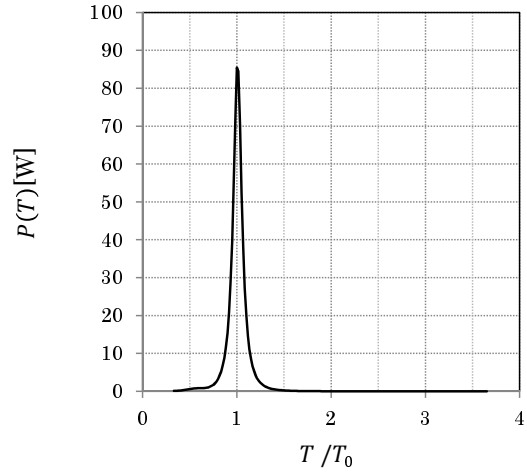
(a) Body shape $\cdot E_1^{(7)}$ -



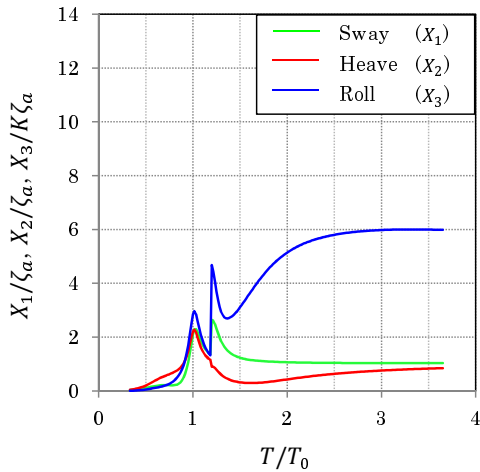
(b) RAO in case of without control $\overline{GM} \cdot E_1^{(7)}$ -



(c) Power in case of without control $\overline{GM} \cdot E_1^{(7)}$ -



(d) RAO in case of with control $\overline{GM} \cdot E_1^{(7)}$ -



(e) Power in case of with control $\overline{GM} \cdot E_1^{(7)}$ -

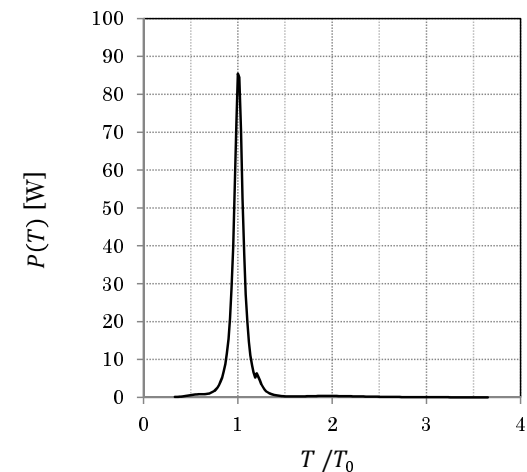
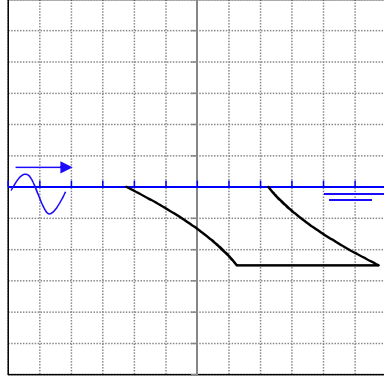


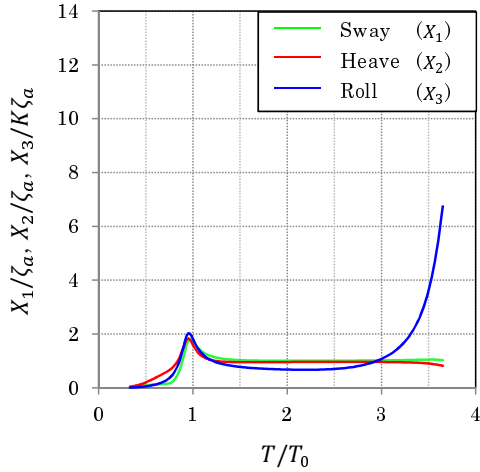
Fig. 5.38: Shape suitable for controlling the $\overline{GM} \cdot E_1^{(7)}$ -.

・GM制御することによる最適形状を検討した結果：最も評価値の高い形状 $E_1^{(8)}$

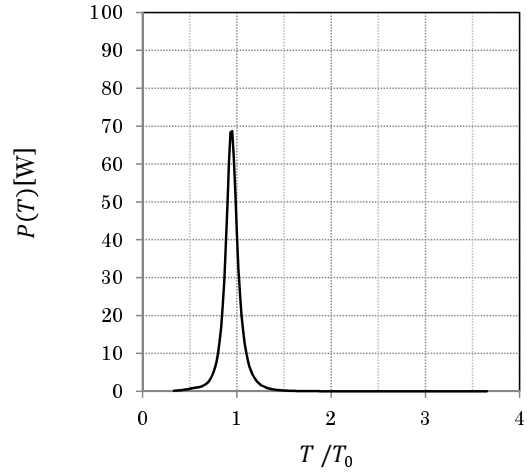
(a) Body shape $\cdot E_1^{(8)}$ -



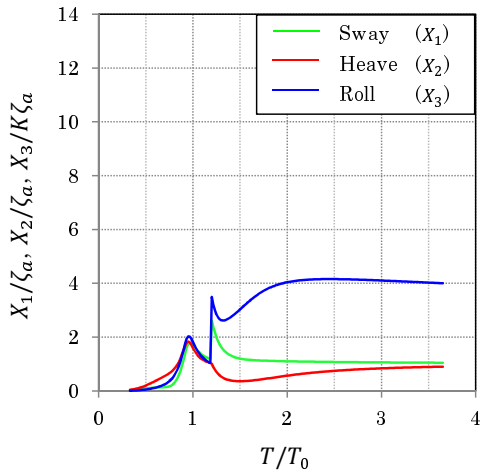
(b) RAO in case of without control $\overline{GM} \cdot E_1^{(8)}$ -



(c) Power in case of without control $\overline{GM} \cdot E_1^{(8)}$ -



(d) RAO in case of with control $\overline{GM} \cdot E_1^{(8)}$ -



(e) Power in case of with control $\overline{GM} \cdot E_1^{(8)}$ -

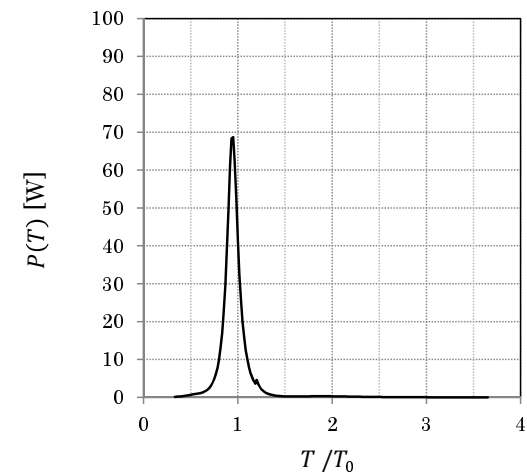
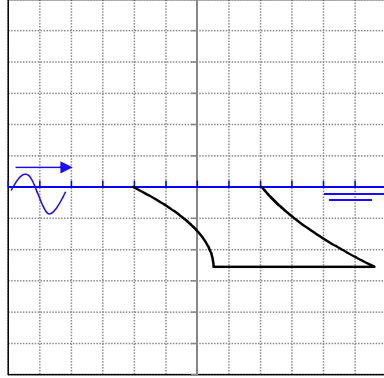


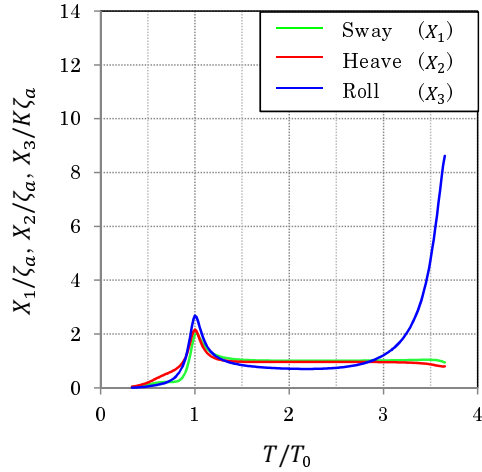
Fig. 5.39: Shape suitable for controlling the $\overline{GM} \cdot E_1^{(8)}$ -.

・GM制御することによる最適形状を検討した結果：最も評価値の高い形状 $E_1^{(9)}$

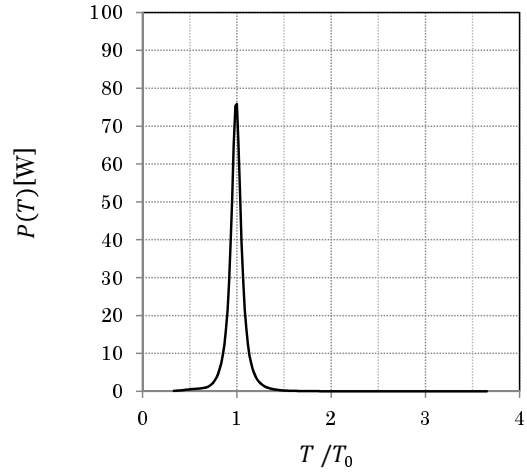
(a) Body shape $\cdot E_1^{(9)}$ -



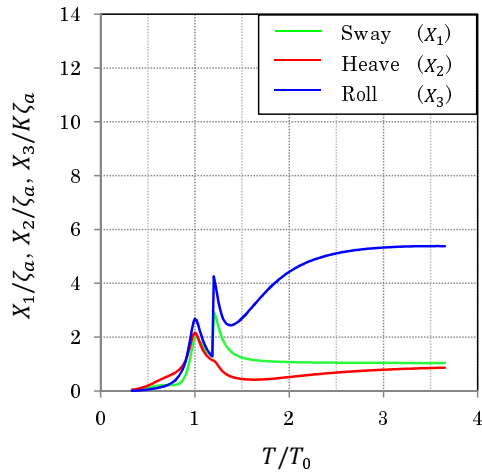
(b) RAO in case of without control $\overline{GM} \cdot E_1^{(9)}$ -



(c) Power in case of without control $\overline{GM} \cdot E_1^{(9)}$ -



(d) RAO in case of with control $\overline{GM} \cdot E_1^{(9)}$ -



(e) Power in case of with control $\overline{GM} \cdot E_1^{(9)}$ -

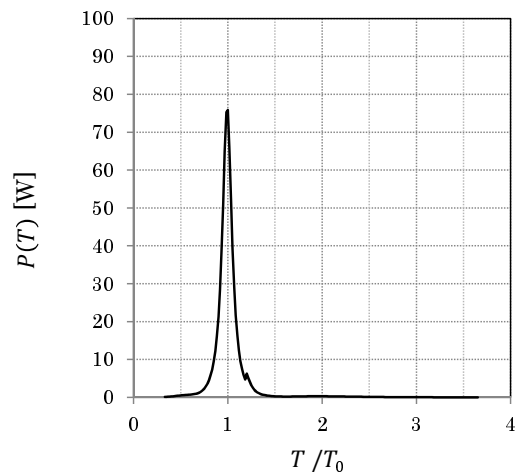
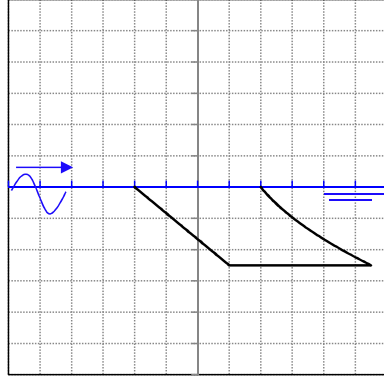


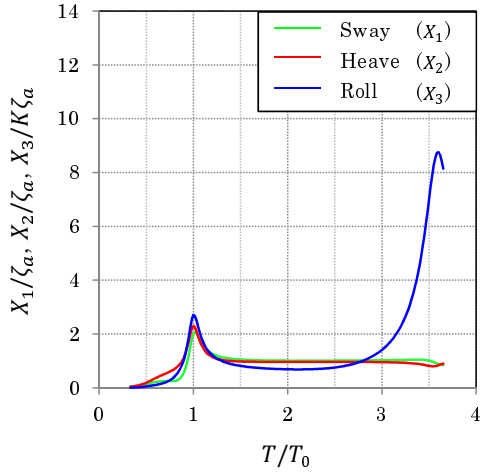
Fig. 5.40: Shape suitable for controlling the $\overline{GM} \cdot E_1^{(9)}$ -.

・GM制御することによる最適形状を検討した結果：最も評価値の高い形状 $E_1^{(10)}$

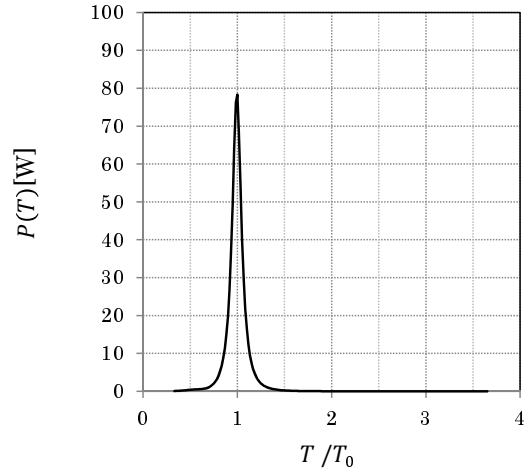
(a) Body shape $-E_1^{(10)}$.



(b) RAO in case of without control $\overline{GM} - E_1^{(10)}$.



(c) Power in case of without control $\overline{GM} - E_1^{(10)}$.



(d) RAO in case of with control $\overline{GM} - E_1^{(10)}$.



(e) Power in case of with control $\overline{GM} - E_1^{(10)}$.

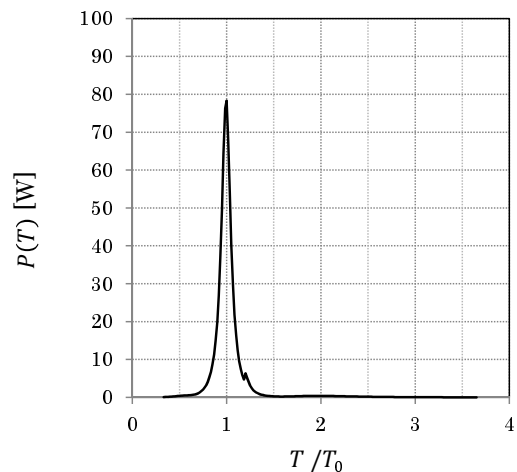
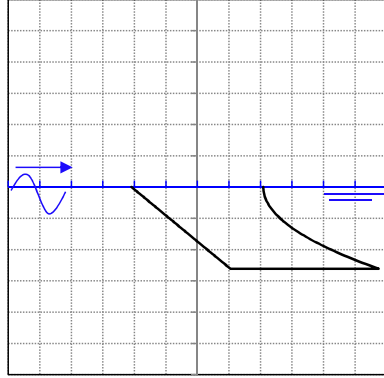


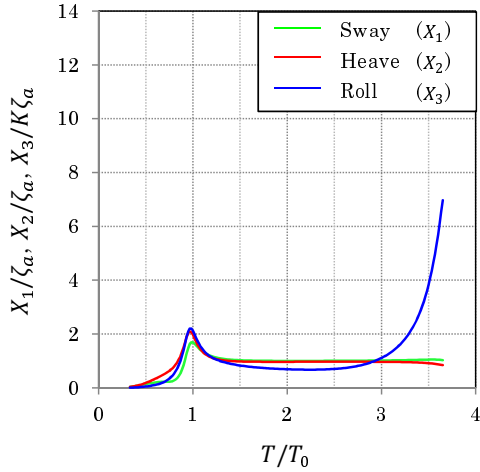
Fig. 5.41: Shape suitable for controlling the $\overline{GM} - E_1^{(10)}$.

・GM制御することによる最適形状を検討した結果：最も評価値の高い形状 $E_1^{(11)}$

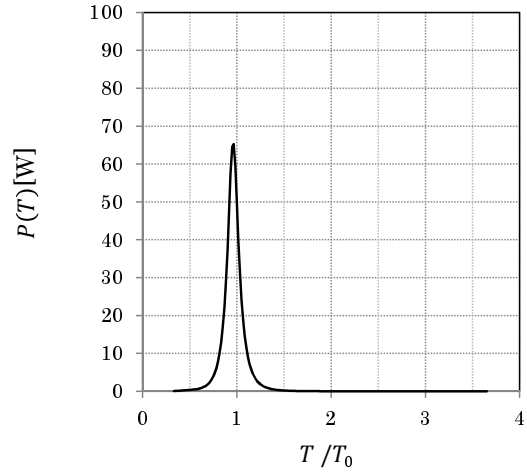
(a) Body shape $\cdot E_1^{(11)}$.



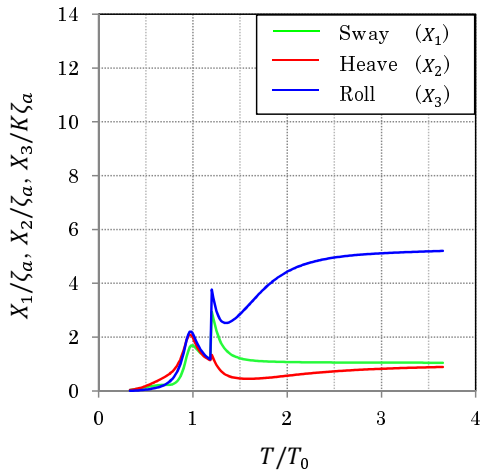
(b) RAO in case of without control $\overline{GM} \cdot E_1^{(11)}$.



(c) Power in case of without control $\overline{GM} \cdot E_1^{(11)}$.



(d) RAO in case of with control $\overline{GM} \cdot E_1^{(11)}$.



(e) Power in case of with control $\overline{GM} \cdot E_1^{(11)}$.

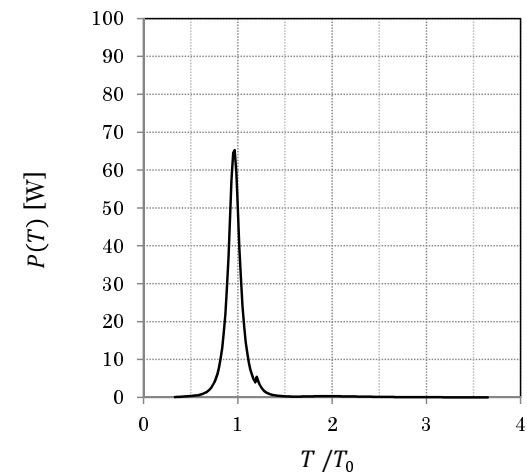
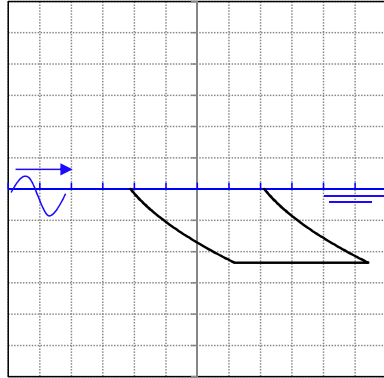


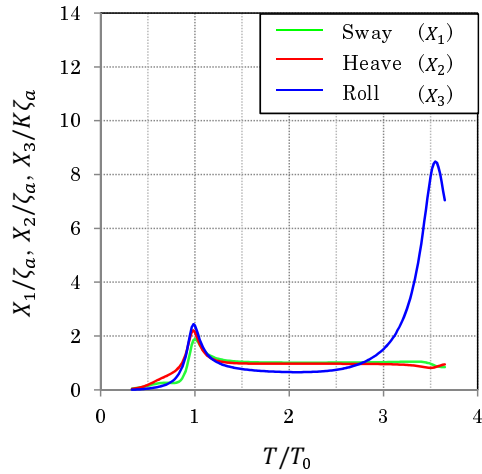
Fig. 5.42: Shape suitable for controlling the $\overline{GM} \cdot E_1^{(11)}$.

・GM制御することによる最適形状を検討した結果：最も評価値の高い形状 $E_1^{(12)}$

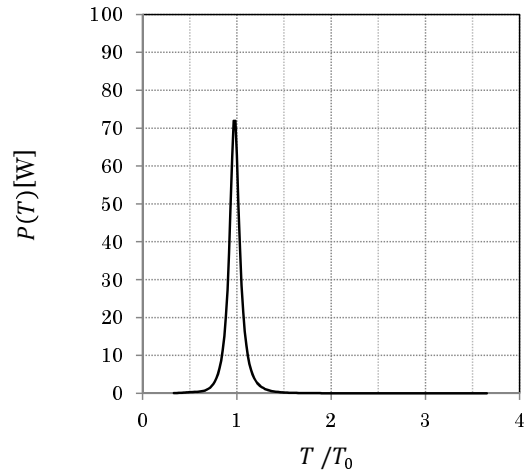
(a) Body shape $\cdot E_1^{(12)}$.



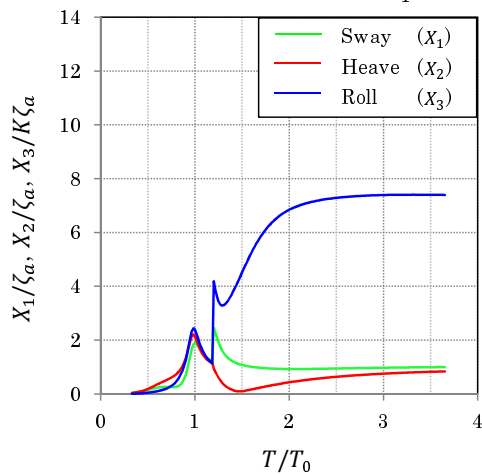
(b) RAO in case of without control $\overline{GM} \cdot E_1^{(12)}$.



(c) Power in case of without control $\overline{GM} \cdot E_1^{(12)}$.



(d) RAO in case of with control $\overline{GM} \cdot E_1^{(12)}$.



(e) Power in case of with control $\overline{GM} \cdot E_1^{(12)}$.

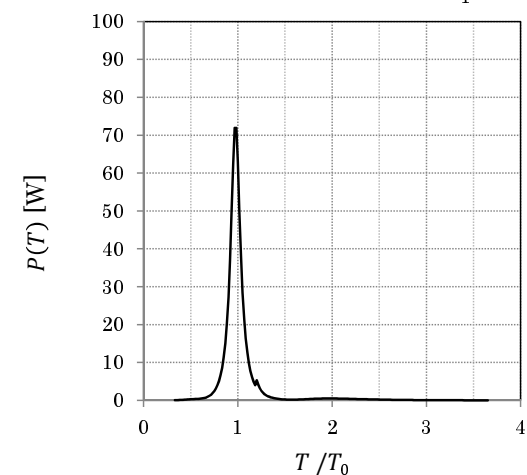


Fig. 5.43: Shape suitable for controlling the $\overline{GM} \cdot E_1^{(12)}$.

第6章 結論

本研究では、浮体式の可動物体型波力発電装置を対象として、各条件の下で最適となる形状を探索し、それらを形状的に比較することにより、下記のことを明らかにすることを目的に検討した。

- ① 波力発電装置の評価手法について、現状代替的に用いられる評価手法の妥当性について
- ② 複数機配置を想定する場合、単機配置で優れた性能の浮体形状は、複数浮体を配置した場合においても優れた形状となるのかについて
- ③ 変動する海洋環境に対して、波周期と浮体運動を同調させる（同調制御）ことの有効性。また、これに適した形状の存在の有無について

上記の検討項目に対して、次のことを明らかにした。

①について

本研究では、波力発電装置の評価手法について、現状代替的に用いられる評価手法の妥当性を検討することを目的とした。現状代替的に用いられる評価手法とは、「波エネルギー収支を評価する」手法、「応答振幅の大きさを評価する」手法、「運動エネルギーの大きさを評価する」手法の3種類の手法のことを指し、理想的な評価手法である「エネルギー吸収機構の吸収する吸収量で評価する」手法と比較した。比較検討の方法は、これら4種類の評価手法において、それぞれ最も評価の高い形状を幾何学的に観察することで妥当性を検討した。その結果、検討した4手法で、Fig.3.10に示したように、それぞれ異なる形状が最適形状として得られた。ただし、「応答振幅の大きさを評価する」手法で得られた形状以外は、形状的特長がよく似ており、水線長がほぼ等しいことが要因であることを明らかにした。また、それぞれの評価手法において、評価の高い上位10形状を比較することにより、「エネルギー吸収機構の吸収する吸収量で評価する」手法の代替的な手法としての妥当性を検討した。その結果、以下の3点を明らかにした。

- 検討した4手法で、同一の形状となることは無く、それぞれ異なる形状が最適形状として得られた。ただし、「エネルギー吸収機構の吸収量で評価」、「波エネルギー収支で評価」、「運動エネルギーで評価」の3手法

では、形状的に類似していたことから、波力発電装置に適した形状を傾向分析する場合には有効であることを示した。

- 「波エネルギー収支で評価」、「運動エネルギーで評価」、「エネルギー吸収機構の吸収量で評価」の3手法で得た最適形状 Body "A" , Body "C" および Body "D" の間を補完することで、①各手法で得た最適形状と類似するさらに評価の高い形状が存在するが、本研究における表現方法では形成できない、②各手法ごとに最適な形状が存在するのか検討した。その結果、Body "A" , Body "C" および Body "D" の間でより評価の高い形状が無いことを確認し、②が正しいことを示した。
- それぞれの評価手法において、評価の高い上位 10 形状を比較することにより、「波エネルギー収支で評価する手法」は「エネルギー吸収機構の吸収する吸収量で評価する」手法の代替的な手法としてある程度妥当であることを示した。

②について

複数機配置を想定する場合、単機配置で優れた性能の浮体形状は、複数浮体を配置した場合においても優れた形状となるのか検討した。まず、「波エネルギー収支で評価」する手法と「エネルギー吸収機構の吸収量で評価」する手法を用いて、それぞれ単機配置で最適形状となった形状と複数機配置で最適となった形状が異なることを示した。(Fig.4.6)「波エネルギー収支で評価」する手法では、配置する機数によって異なる形状が探索されたが、形状的特徴は共通していた。一方、「エネルギー吸収機構の吸収量で評価」する手法では、「単機」と「複数機」で形状的特徴が大きく変化した。したがって、節で述べた「単機配置で優れた性能の浮体形状は、複数浮体を配置した場合においても優れた形状となるのか」に対しては、評価手法によって異なるが、発電機構を想定した「エネルギー吸収機構の吸収量で評価」する手法では、「単機配置で優れた形状」と「複数浮体配置した場合においても優れた形状」ではないことが明らかになった。それは、単機で最適な形状は、自身で波エネルギーを吸収し、後方に透過する波が少ないが、複数機の場合はある程度の波の透過を許して、後方浮体との干渉影響によって吸収するエネルギーを増幅させるためであると考えられる。

③について

\overline{GM} 制御を想定し、発電機構の固有周期を波周期に合わせて変化させることに適した最適形状は、 \overline{GM} 制御しないときの最適形状に対して形状的特徴は似ているが、水線長が短くなるなど、 \overline{GM} 制御を想定した場合に対して比較的变化が大きいことがわかった。また、Body "G₁" は \overline{GM} と発電機構の固有周期を変化させた場合において最適形状となったが、 \overline{GM} のみを変化

させた場合での形状探索では探索されなかったことから、 \overline{GM} のみを変化させるのではなく、発電機構の固有周期を変化させることを組み合わせて形状探索した方が、より優れた形状を探索出来ることが期待できる。

波力発電装置は、1799年フランスのGirardによる研究から始まったとされるため、200年以上の長い歴史があるが、未だに実現例がなく、研究レベルにとどまっているというのが現状である。その原因は、厳しい海洋環境の中に置かれるが故の不安定性、コストパフォーマンスの低さ、メンテナンスの手間など、技術的な課題から経済的な課題など多岐にわたる。しかし、本研究で明らかにした、「評価手法に関する検討」、「複数機配置に関する検討」、幅広い周期域で発電できるようにする「安定性に関する検討」は波力発電の実現に向けて、着実な一歩となることを期待する。

ただし、本研究で導いたものは、浮体形状の設定方法やエネルギー吸収機構の設定などに、ある程度の制約を課した上での結論である。今後は形状設定に更なる柔軟性を持たせ、形状表現の質と幅を上げることが課題となる。また、今後の波浪発電では1次元的な配置だけでなく、面的な配置も検討されてきており、想定される配置に応じた3次元的な最適形状についての検討や想定海域に応じたスペクトルや発電機構に応じた最適形状の変化について検討することが今後の課題である。

謝辞

本研究を遂行し学位論文をまとめるに当たり、多くの方々からご協力とご指導を賜りました。非力な私がこのような論文を執筆できたのは一重に皆様のお蔭です。指導教官である村井基彦准教授には修士課程のときより研究室で熱心にご教授してくださいました。時に厳しく、時に励まして下さった在学中の経験は、今後の努力の糧になるものであります。深く感謝しております。

また、2011年度から2014年度までの間に3回に渡って佐賀大学海洋エネルギー研究センターの水槽を利用させて頂きました。惜しみなくご協力して下さった佐賀大学の今井康貴准教授、松永成正技能補佐員および佐賀大学の学生の皆様方にこの場を借りて深く御礼申し上げます。

本論文作成に当たり、審査委員として多くの助言を頂きました、山田貴博教授、上野誠也教授、樋口丈浩准教授、平川嘉昭准教授には深く感謝いたします。

また、学部4年次および修士課程の時に研究の指導をして下さった平山次清名誉教授、平川嘉昭准教授、高山武彦特別研究教員には研究に関する事だけでなく、多岐にわたりご指導を賜りました。深く感謝しております。

最後に、これまで私が思う道を進むことに対して温かく見守り、そして辛抱強く支援して下さいました両親に対しては深く感謝の意を表して謝辞と致します。

岡田尚樹

参考文献

- 1) エネルギー白書 2013, (2013, 資源エネルギー庁),
<http://www.enecho.meti.go.jp/topics/hakusho/2013/index.htm>.
- 2) Electricity information2013, (2013, IEA).
- 3) NEDO 再生可能エネルギー技術白書 初版, (2010, 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構).
- 4) NEDO 再生可能エネルギー技術白書 第2版, (2014, 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構).
- 5) 前田久明, 木下健: 波浪発電, 東大生研, 31 卷 11 号, 1979.
- 6) 高橋重雄: 港湾技術研究資料, No654, 1989.
- 7) Glendenning, I.: Energy from waves, Oceanology International 78 (1978).
- 8) EMEC (European Marine Energy Centre) ホームページ,
<http://www.emec.org.uk/>.
- 9) 菅真: 非対称浮体による波エネルギー吸収効率について, 船研講演概要 32, 1978.
- 10) Falcao, A.: The development of wave energy utilization. In :2008 Annual Report, A . Brito-Melo and G.Bhuyan (eds.), International Agency Implementing Agreement on Ocean Energy Systems, Lisboa, Portugal, pp.30-37, 2009.
- 11) Matt Folly and Trevor Whittaker : Identification of non linear flow characteristics of the LIMPET shoreline OWC, Proc.12th ISOPE Kitakyushu, Japan, 2002.
- 12) Oceanlinx ホームページ : <http://www.oceanlinx.com/>.
- 13) Ocean Energy ホームページ : <http://oceanenergy.ie/>.
- 14) 海洋科学技術センター: 波力発電装置「海明」第期計画研究報告書, 214p. 1988.

- 15) JAMSTEC : 波浪エネルギー利用技術の研究開発ー沖合浮体式波力発電装置「マイティール」の開発, 2004.
- 16) 鷺尾幸久, 大澤弘敬, 永田良典, 藤井文則, 古山裕喜, 藤田俊助 : 沖合浮体式波力装置「マイティール」実海域実験その1 実験システム概要及び係留設置工事, 海洋科学技術センター試験研究報告 第40号, 2000.
- 17) Pelamis Wave Power ホームページ : <http://www.pelamiswave.com/>.
- 18) Pelamis Wave Power プレスリリース:<http://www.pelamiswave.com/news/134/ScottishPowerzRenewables-Pelamis-P2-Machine-Celebrates-One-Year-Of-Accerated-Real=Sea-Testing/>.
- 19) Ocean Power Technologies ホームページ : <http://www.oceanpowertechnologies.com/>.
- 20) Aquamarine power ホームページ : <http://www.aquamarinepower.com/>.
- 21) 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.
- 22) Lars K. Hansen, Lars Christensen and Hans Chr. Sorensen : Experiences from the Approval Process of the Wave Dragon Project, Proc. 5th European Wave Energy Conference Cork, Ireland, 2003.
- 23) Diego Vicinanza Lucia Margheritini, Jens Peter Kofoed and Mariano Bucino : The SSG Wave Energy Converter: Performance, Status and Recent Developments, 193-226, Energies, 2012.
- 24) 渡部富治 : 実用化に向かう波力発電, パワー社, 2009.
- 25) 前田久明, 田中裕久, 岩瀬律雄 : 波浪発電に関する基礎的研究 (その1), 日本造船学会論文集, vol.146.
- 26) 前田久明, 高木健, 加藤俊司 : 波浪発電に関する基礎的研究 (その2), 日本造船学会論文集, vol.149.
- 27) 木下健, 前田久明, 西條憲一, 岩瀬律雄 : 波浪発電に関する基礎的研究 (その3), 日本造船学会論文集, vol.150.
- 28) 木下健, 前田久明, 増田光一, 西條憲一, 今井康廣 : 波浪発電に関する基礎的研究 (その4), 日本造船学会論文集, vol.151.
- 29) 前田久明, 木下健, 増田光一, 林秀郎, 加藤渉 : 波浪発電に関する基礎的研究 (その5), 日本造船学会論文集, vol.152.

- 30) 阿部正紀, 高木儀昌, 岩崎直雅, 佐久田昌昭 : 波浪強制力を受けない形状に関する研究-その 1. 形状の検討-, 日本建築学会大会学術講演論文集, vol.10041, 1984
- 31) 岩崎直雅, 高木儀昌, 阿部正紀, 佐久田昌昭 : 波浪エネルギー吸収装置の浮体形状に関する研究-その 2. 運動について-, 日本建築学会大会学術講演論文集, vol.10042, 1984
- 32) 阿部正紀, 高木儀昌, 岩崎直雅, 佐久田昌昭 : 波浪エネルギー吸収装置の浮体形状に関する研究-その 1-, 日本建築学会大会学術講演論文集, vol.10016, 1985
- 33) 岩崎直雅, 高木儀昌, 阿部正紀, 佐久田昌昭 : 波浪エネルギー吸収装置の浮体形状に関する研究-その 2-, 日本建築学会大会学術講演論文集, vol.10017, 1985
- 34) 高木又男, 澤山健一, 山口栄三 : 流線追跡法による消波浮体形状の理論計算, 関西造船協会誌, 第 182 号, 1981
- 35) M.KASHIWAGI, F.MAHMUDDIN : 3D Effects on Wave Reflection Performance of a Floating Breakwater, 第 23 回海洋工学シンポジウム, OES23-052, 2012
- 36) 小林正典, 中川寛之 : 複合浮体型波浪発電装置に関する基礎的研究, 日本造船学会論文集, 第 152 号, 1982
- 37) 小林正典, 中川寛之 : 複合浮体型波浪発電装置に関する基礎的研究 (第 2 報), 日本造船学会論文集, 第 154 号, 1983
- 38) 日本造船学会海洋工学委員会性能部会編 : 実践 浮体の流体力学前編—動揺問題の数値計算法, 成山堂, 2003, pp. 99-196
- 39) 平野廣美 : 応用事例でわかる遺伝的アルゴリズムプログラミング, パーソナルメディア, 1995
- 40) 北野宏明 : 遺伝的アルゴリズム 1, 産業図書, 1993
- 41) 菅信 : 二次元造波理論, 三次元造波理論, 第 2 回対航性に関するシンポジウム 第 2 章, 日本造船学会, 1977
- 42) 柏木正 : 特集「よくわかる海事流体力学」第 6 章船舶海洋構造物の動揺を計算する, 日本造船学会誌 第 845 号, 1999
- 43) 平山次清 斎藤靖浩 : 新形式アンチローリングシステムの開発, 関西造船協会誌, 第 230 号, 1998
- 44) 柿添光治, 平山次清, 平川嘉昭, 高山武彦, 岡田尚樹, 山根亜紀子 : 実船対応コリオリ式垂直型アンチローリングシステムの開発と実海域試験, 日本船舶海洋工学会, 第 12 号, 2010

付 録

A1. Bezier 曲線

Bezier 曲線とは、 N 個の設計変数から得られる $(N - 1)$ 次曲線であり、設計変数を B_0, B_1, \dots, B_{N-1} とすると、

$$P(t) = \sum_{i=0}^{N-1} B_i J_{(N-1)i}(t) \quad (\text{A1})$$

と表現できる。ただし、 J_{ni} は Bernstein 多項式と呼ばれ

$$J_{n,i}(t) = C_n^i t^i (1-t)^{n-i}, C_n^i = \frac{n!}{i!(n-i)!} \quad (\text{A2})$$

で与えられる。 t が 0 から 1 まで変化するとき、 B_0 と B_{N-1} を両端とする Bezier 曲線が得られる。

A2. 遺伝的アルゴリズム

遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithms : GA) とは、生物が環境に適応して進化していく過程を工学的に模倣したアルゴリズムであり、ある問題に対する最適解を求めるための一手法と考えることができる。GA は 1970 年頃から研究され、その後様々に応用研究された。ここでは、本研究において浮体の形状を形成する際に用いた基本的な遺伝的アルゴリズムについて示す。

GA では、個体 (Individual) は設計変数の値がコーディングされた染色体 (Chromosome) と呼ばれる文字列上で表現され、この染色体をデコーディングすることにより設計変数を読み出し、目的関数の値を計算する。このとき、染色体の構造のことを遺伝子型 (Geno Type)、これによって定まる個体の形質を表現型 (Pheno Type) と呼ぶ。また、個体の集団のことを母集団 (Population) と呼ぶ。GA はこの母集団に対して選択 (Selection)、交叉 (Crossover)、突然変異 (Mutation) などの遺伝的操作を繰り返し行うことによって解探索を行う。

A2.1 遺伝的アルゴリズムの流れ

遺伝的アルゴリズム (GA) は、基本的に Generate-and-Test 型のアルゴリズムで、一般に 3 種類の遺伝的操作 (genetic operations) を用いる。

- 選択 (selection)
- 交叉 (crossover)
- 突然変異 (mutation)

これらの操作に関しては、後で詳しく解説する。解の候補は、遺伝子型 (genotype) として染色体 (chromosome) に1次元的に表現される。各世代は、個体 (individual) の集合である。各世代における個体数を population size と呼ぶ。

本研究で用いた遺伝的アルゴリズムの処理手順は Fig.A1 のようになる。

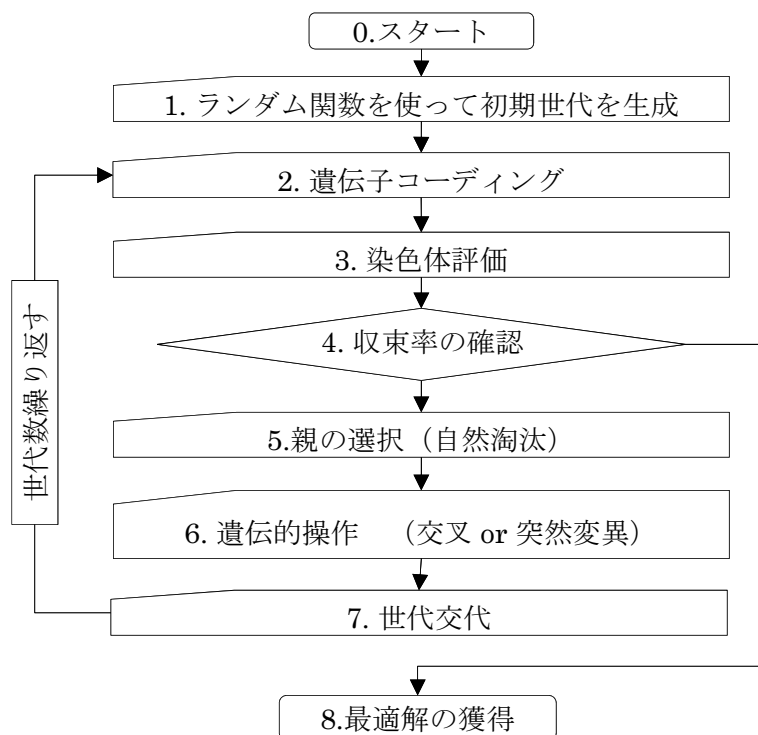


Fig. A1: Calculation flow of GA

A2.2 遺伝子コーディング（浮体形状の設計）

まず，初期世代の生成を行う．一般には，決められた個体数の染色体をランダムに生成する．本研究では，Fig.A2のように遺伝子コーディングを行った．

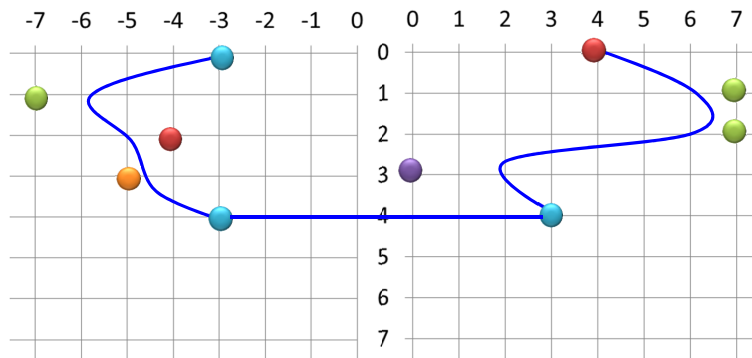


Fig. A2: The formation of the floating body shape

Fig.A2に示すように，グリッドの上に設計変数を配置する（Z方向は等間隔，X方向はランダム）．そして各設計変数の間を補完することで浮体の側面形状を形成する（Fig.A2ではBezier曲線で補完している）．これらの設計変数のX方向は，波上側（Weather side）では-7から0，波下側（Lee side）では0から7の間としている．これは，各設計変数をFig.A3に示すように，2進数で表現しているためである．これらの設計変数を波上側と波下側で集合させ，これらを独立した遺伝子とし，1つの浮体形状を構成する遺伝子群を染色体とする．

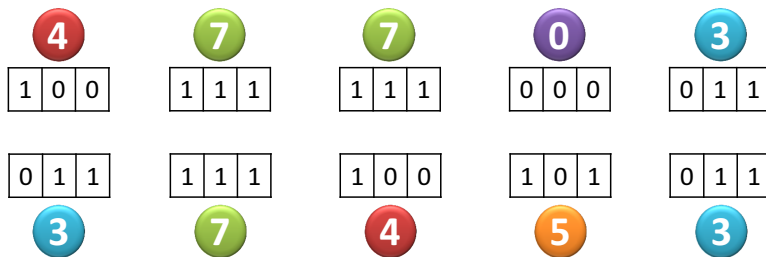


Fig. A3: Formation of design variables (Gene coding).

Fig.A3のように、仮に、1つの設計変数を3bit、染色体を10個の二系変数で構成すると合計30bitとなる。1形状あたりの設計変数の数を6, 8, 10とした場合の、組み合わせの総パターン数と、それを全て計算するのにかかる計算時間の目安をTable.A1にまとめる。計算時間に関しては、1形状あたり10[sec]として計算している。

Table A1: Estimated computation time and the number of genes.

The number of design variables	The total number of patterns	Calcuration time (day)
6 (18bit)	$8^6 = 262,144$	61
8 (24bit)	$8^8 = 16,777,216$	3883
10 (30bit)	$8^{10} = 1,073,741,824$	248551

A2.3 遺伝的操作

選択交配

選択淘汰の圧力を与える際に重要なのが、どの個体同士を交配させるかである。その選択方法のなかで代表的な、また本論文中で使用する方法を紹介する。

適応度比例戦略は、ルーレットモデル、またはモンテカルロモデルとも呼ばれ、各個体の適応度に比例した確率で子孫を残せる可能性があるモデルである。(Fig.A4 参照)

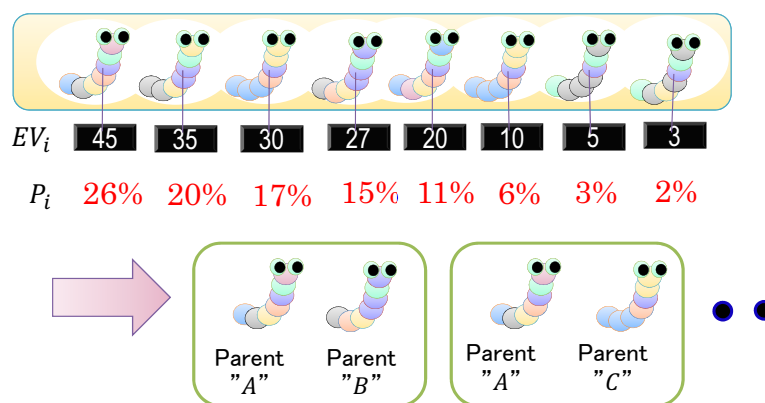


Fig. A4: Selection of parents.

ある個体 i が、各々の選択で選ばれる確率 P_i は、次式で表される。

$$P_i = \frac{EV_k}{\sum_{k=1}^n EV_k} \quad (A3)$$

(A3) 式中の EV とは、本研究で扱った浮体形状の評価値のことを指す。

交叉

交叉 (crossover) は、二つの親の染色体を組み替えて子の染色体を作る操作である。最も単純な方法は、交叉する位置を一つ決めてその前後で、どちらの親の遺伝子を受け継ぐかを変える方法である。これを、単純交叉 (simple crossover)、または一点交叉 (one-point crossover) と呼ぶ。一方、複数点交叉 (multipoint crossover) とは、交叉位置が複数ある方法である。例えば、交叉位置が 2 と 5 なら、新たな固体の一つは個体 A の先頭から 2 番目まで、固体 B の 3 番目から 5 番目まで、固体 A の 6 番目から最後までによって、遺伝子が作られる。

本研究では、2 点交叉を採用した。1 点交叉とすると、交叉する度に水線上の設計変数が組み換えられる可能性が高く、収束が難しくなると考えたためである。Fig.A5 に示すように、選択された親 (Parent) のうち、交叉する設計変数と選択する範囲はランダムに選択する。例えば、選択された設計変数が 5 と 2 だとする。これを 2 進数で表現すると、"5" は "101" であり、"2" は "010" である。この中から、交叉する範囲をランダムに選択し、右 2 つが選択されたとすると、交叉した結果、"5" と "2" は "6" と "1" となる。このようにして、次世代の子孫を生成する。この流れを浮体形状に応用した例が、Fig.A6 である。

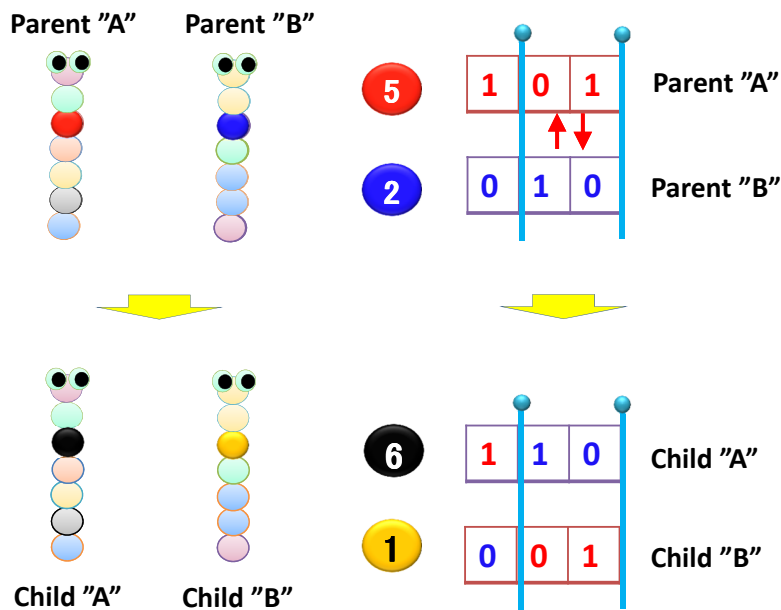


Fig. A5: Genetic operations (crossover).

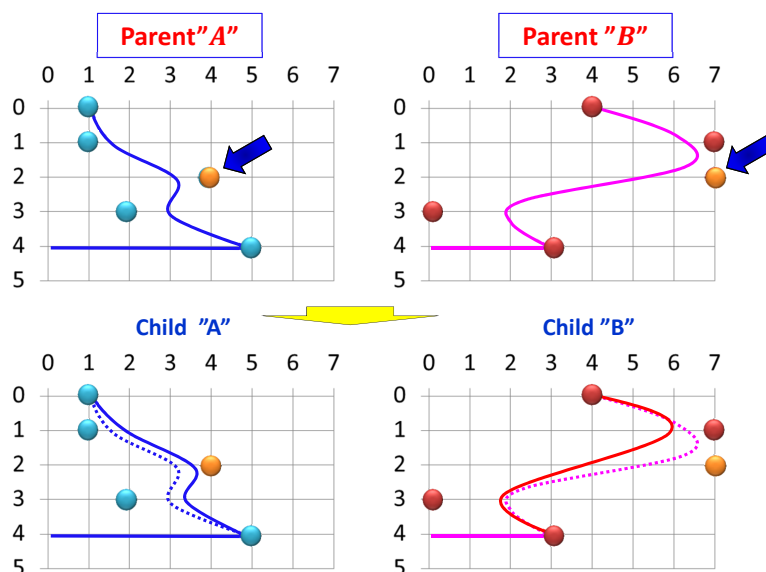


Fig. A6: Genetic operations applied to the floating body shape(crossover).

突然変異

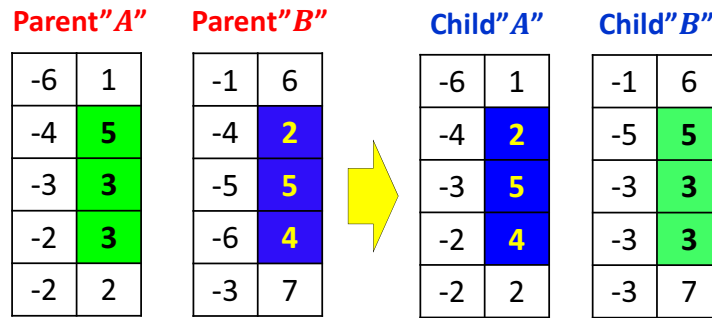
突然変異は、遺伝子を一定の確率で変化させる操作である。突然変異はあまり大きな変異確率に設定すると、スキーマがことごとく破壊されるためランダムサーチと化してしまう恐れがある。しかし、反対に突然変異がないと、偏った結果のままとなってしまいますので、ある程度の変異は必要である。突然変異が無い場合は、初期の遺伝子の組み合わせ以外の空間を探索することはできず、求められる解の質にも限界が出てくる。

本研究では、Fig.A7に示すように、浮体形状に応用した。すなわち、交叉が遺伝子の1部を組替えていたのに対して、突然変異は染色体の1部を組替える操作とした両親の組替える位置と範囲はランダムに選択し、「波上側」と「波下側」のように符号の異なる組み合わせとなった場合には、符号を入れ替える。

世代交代

世代交代は、ある世代の遺伝子の数を一定に保つため、一定数の親と新たに生成された子を入れ替える作業のことである。本研究では、評価値の高い遺伝子を一定数選択して次世代に引き渡す、エリート戦略を採用した。(Fig.A8) 次世代に引き渡す遺伝子の数は世代間ギャップ (Generation Gap) で設定する。世代間ギャップを G とした場合、 $n(n - G)$ の遺伝子がエリート戦略で選択されて、次世代にコピーされる。残りの nG の遺伝子は交叉や突然変異により生成された次世代の遺伝子となる。

The current generation



The next generation

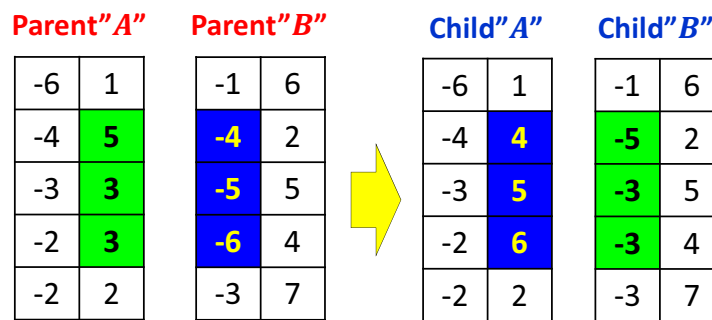
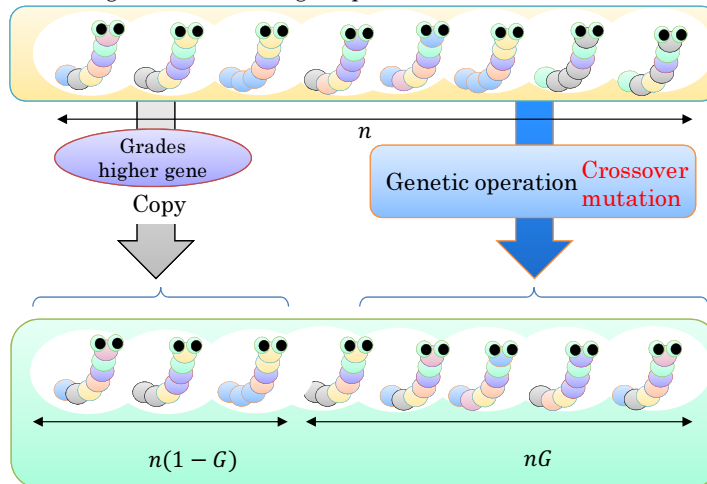


Fig. A7: Genetic operations mutation.

The current generation of the gene pool



The next generation of the gene pool G : Generation gap [%]

Fig. A8: Alternation of generations.

