

東京大学大学院新領域創成科学研究科

海洋技術環境学専攻

平成 22 年度

修士論文

海流発電用プラットフォームの
技術的成立性に関する研究

2010 年 7 月提出

指導教員 鈴木 英之 教授

47-086808

谷 翔志

目次

目次.....	1
1. 序論.....	8
1.1 地球温暖化.....	8
1.2 再生可能エネルギー.....	10
1.3 海洋エネルギー.....	11
1.4 本研究における先行研究.....	14
1.4.1 設置海域に関する調査.....	15
1.4.2 プラットフォームに関する検討.....	15
1.4.3 海流発電用プラットフォームの動的応答解析.....	17
1.4.4 海流発電用プラットフォームの流体力評価.....	19
1.4.5 先行研究の進捗具合.....	21
2. 研究の目的と方法.....	22
2.1 研究の手順.....	22
2.1.1 海流発電の動的応答解析プログラムの作成.....	22
2.1.2 海流発電用プラットフォームの流体力評価.....	24
2.1.3 海流発電用プラットフォームの模型実験.....	25
2.1.4 海流発電用プラットフォームの技術的成立性の検討.....	25
3. 海流発電の動的応答解析プログラム.....	26
3.1 骨組構造物の動的応答解析プログラム.....	27
3.1.1 二次元トラスの静的応答解析プログラムの作成.....	27
3.1.2 三次元骨組構造物の動的応答解析プログラム.....	30
3.2 流体力評価プログラムの作成.....	39
3.2.1 楕円柱の流体力評価法.....	40
3.2.2 流体速度、流体加速度の計算方法.....	47
3.2.3 分布荷重.....	48
3.2.4 楕円柱曳航実験.....	51
3.2.5 ロータと浮体の相互干渉効果計測実験.....	60
3.3 海流発電の動的応答解析プログラムの作成.....	72
4. プログラムの検証実験.....	74
4.1 実験装置.....	74
4.2 造波実験.....	74
4.2.1 実験データ.....	77
4.2.2 波の周波数と応答の関係.....	82
4.3 プログラムデータとの比較.....	83

5. 海流発電の技術的成立性の検討.....	87
5.1 提案している海流発電用プラットフォーム	87
5.2 設置海域	88
5.3 自然環境条件	89
5.4 海流発電用プラットフォームの周波数応答特性	89
5.5 波と流れの共存場における周波数応答特性	93
5.6 海流発電用プラットフォームの応力特性	96
5.7 考察	97
6. 結論	99
7. 今後の課題.....	101
8. 参考文献	102
謝辞.....	104

図表目次

Fig.1-1 大気中の二酸化炭素濃度の経年変化[IPCC 第 4 次評価報告書 2007].....	9
Fig.1-2 地球再生計画の概念図 1[IPCC,2007]	9
Fig.1-3 地球再生計画の概念図 2[IPCC,2007]	10
Fig.1-4 日本の風力発電のロードマップ[NEDO,2005].....	11
Fig.1-5 太陽光発電のロードマップ[NEDO].....	11
Fig.1-6 ランス潮汐発電所[フランス電力公社].....	13
Fig.1-7 Sea Gen[Marine Current Turbines 社]	13
Fig.1-8 Pelamis[Ocean Power Delivery].....	14
Fig.1-9 海洋温度差発電[ダミル・ナドゥ].....	14
Fig.1-10 本研究室で提案している海流発電用プラットフォーム [1].....	17
Fig.1-11 海流発電用プラットフォームの動的応答解析プログラムの機能.....	18
Fig.1-12 円柱構造の水平荷重評価法の分類と使用条件 [3].....	19
Fig.1-13 波スペクトルの比較 [4].....	20
Fig.1-14 プログラムの開発状況	21
Fig.2-1 研究の流れ.....	22
Fig.2-2 海流発電用プラットフォームの動的応答解析プログラムの機能.....	23
Fig.2-3 海流発電用プラットフォームの動的応答解析プログラムのフロー	23
Fig.2-4 抗力係数とレイノルズ数の関係(Electrathon Vehicle Construction Site データより作成)	24
Fig.3-1 海流発電用プラットフォームの要素分割例[2]	26
Fig.3-2 海流発電用プラットフォームの動的応答解析プログラムの作成フロー ..	26
Fig.3-3 海流発電用プラットフォームの動的応答解析プログラムのフロー	27
Fig.3-4 二次元トラスの静的解析プログラムのフロー.....	28
Fig.3-5 解析したトラスの図.....	28
Fig.3-6 トラスの番号付け	29
Fig.3-7 プログラムの入力情報	29
Fig.3-8 計算結果	30
Fig.3-9 三次元骨組の動的応答解析のプログラムのフロー.....	30
Fig.3-10 楕円柱骨組要素の座標軸 1.....	31
Fig.3-11 楕円柱骨組要素の座標軸 2.....	32
Fig.3-12 剛性マトリクス.....	32
Fig.3-13 部材質量による質量マトリクス	33
Fig.3-14 付加質量による質量マトリクス	33
Fig.3-15 プログラムテストの要素.....	35
Fig.3-16 プログラムテストの要素配置図.....	36

Fig.3-17 プログラムテストの立体骨組解析の入力データ	36
Fig.3-18 立体骨組の X 方向、Y 方向の計算結果.....	37
Fig.3-19 片持ち梁の固有振動数	38
Fig.3-20 計算結果から固有周期の読み取り	38
Fig.3-21 流体力プログラムのフロー	39
Fig.3-22 Froude-Krylov force[3]	41
Fig.3-23 静止流体中で加速する円柱まわりの圧力分布[3].....	43
Fig.3-24 静止流体中で加速する柱状構造に発生する圧力荷重[3]	44
Fig.3-25 柱状構造要素や三次元立体要素の付加質量[3]	44
Fig.3-26 抗力係数とレイノルズ数の関係(Electrathon Vehicle Construction Site データより作成).....	46
Fig.3-27 垂直な円柱に発生する波力[3].....	47
Fig.3-28 等分布荷重と等価な節点荷重.....	51
Fig.3-29 三角分布荷重と等価な節点荷重.....	51
Fig.3-30 船型試験水槽	52
Fig.3-31 実験装置	53
Fig.3-32 実験で用いた楕円柱.....	53
Fig.3-33 検力計.....	54
Fig.3-34 電圧増幅器とオシロスコープ.....	54
Fig.3-35 楕円柱 1 を速度 0.6m/s で曳航した時の電圧変化	55
Fig.3-36 ノイズ除去後の楕円柱 1 を速度 0.6m/s で曳航した時の電圧変化.....	55
Fig.3-37 荷重変換の図	56
Fig.3-38 楕円柱 1 の抗力係数の測定値	57
Fig.3-39 楕円柱 2 の抗力係数の測定値	57
Fig.3-40 楕円柱 1 の揚力係数の測定値	58
Fig.3-41 楕円柱 2 の揚力係数の測定値	58
Fig.3-42 楕円柱の抗力係数、揚力係数(0.08m×0.03m 楕円、長さ 0.6m、流速 0.6m/s)	59
Fig.3-43 楕円柱の抗力係数、揚力係数の近似式 (0.08m×0.03m 楕円、長さ 0.6m、 流速 0.6m/s)	59
Fig.3-44 多孔板の図.....	61
Fig.3-45 実験で用いた多孔板.....	62
Fig.3-46 多孔板単独の抵抗の計算方法	62
Fig.3-47 楕円柱 1 の曳航中の写真.....	63
Fig.3-48 楕円柱 2 の曳航中の写真.....	63
Fig.3-49 楕円柱 2 を速度 0.6m/s で曳航した時の電圧値の変化	64

Fig.3-50 楕円柱 2 を速度 0.6m/s で曳航した時の電圧値の変化（ノイズ除去後）	64
Fig.3-51 楕円柱 1 の曳航速度と荷重	65
Fig.3-52 楕円柱 2 の曳航速度と荷重	65
Fig.3-53 多孔板単独の曳航速度と荷重	66
Fig.3-54 提案している海流発電用プラットフォーム	67
Fig.3-55 海流発電用プラットフォームの実験模型	67
Fig.3-56 実験模型 1 の写真	68
Fig.3-57 実験模型 2 の写真	68
Fig.3-58 実験模型に検力計を設置した図	68
Fig.3-59 実験模型と流れの方向	69
Fig.3-60 実験の様子	69
Fig.3-61 実験模型 1 を速度 0.6m/s で曳航した時の電圧値の変化	70
Fig.3-62 実験模型 1 を速度 0.6m/s で曳航した時の電圧値の変化	70
Fig.3-63 実験模型 1 の曳航速度と荷重の関係	71
Fig.3-64 実験模型 2 の曳航速度と荷重の関係	71
Fig.3-65 干渉効果の確認	72
Fig.3-66 海流発電用プラットフォームの動的応答解析プログラムのフロー	73
Fig.4-1 海流発電用プラットフォームの実験模型	74
Fig.4-2 実験で使用したレーザー変位計	75
Fig.4-3 実験模型の変位測定位置	76
Fig.4-4 波と実験模型の方向	76
Fig.4-5 造波実験の様子	77
Fig.4-6 波高 3cm、周期 1.0s	78
Fig.4-7 波高 3cm、周期 0.9s	78
Fig.4-8 波高 3cm、周期 0.8s	79
Fig.4-9 波高 3cm、周期 0.7s	79
Fig.4-10 波高 6cm、周期 1.0s	80
Fig.4-11 波高 6cm、周期 0.9s	80
Fig.4-12 波高 6cm、周期 0.8s	81
Fig.4-13 波高 6cm、周期 0.7s	81
Fig.4-14 波高 9cm、周期 1.0s	82
Fig.4-15 波高 9cm、周期 0.9s	82
Fig.4-16 波の周波数と応答振幅の関係	83
Fig.4-17 海流発電用プラットフォームの実験模型	83
Fig.4-18 実験模型の要素分割図[2]	84
Fig.4-19 実験模型の周波数応答曲線(プログラム計算結果)	84

Fig.4-20 実験で使用した海流発電の実験模型.....	85
Fig.4-21 実験値とプログラム値の比較.....	86
Fig.5-1 本研究室で提案している海流発電の図 1 [1]	87
Fig.5-2 本研究室で提案している海流発電の図 2[1]	88
Fig.5-3 提案している海流発電用プラットフォーム	90
Fig.5-4 提案している海流発電用プラットフォームの要素分割図[2].....	90
Fig.5-5 海流発電用プラットフォームと波向きとがなす角の定義	91
Fig.5-6 海流発電用プラットフォームの周波数応答関数（角度 0° ）	91
Fig.5-7 海流発電用プラットフォームの周波数応答関数（角度 90° ）	92
Fig.5-8 波と流れの共存場での周波数応答関数(波と流れは同方向).....	94
Fig.5-9 波と流れの共存場での周波数応答関数(波と流れは逆方向).....	95
Fig.5-10 波のみの周波数応答と波と流れ(波と流れの向き同方向)の周波数応答 ..	95
Fig.5-11 海流発電用プラットフォームの周波数と応力の関係	96
Fig.5-12 節点番号 18 の同調時の変位と応力の時系列変化	97
Fig.5-13 周波数と応力の関係.....	97

1. 序論

環境問題、エネルギー問題が人類にとって大きな課題となっている現在、再生可能エネルギーの開発が世界的に活発化している。再生可能エネルギーの源は、風力、水力、地熱、太陽光など多種多様である。そのなかで、地球表面の 7 割を占める広大な海が有するエネルギーを海洋エネルギーといい、これからの有望なエネルギー源として大きな期待を集めている。その海洋エネルギーの利用法として検討が盛んになっている発電法のひとつに海流発電がある。海流発電とは、黒潮やメキシコ湾流等の流れが速い海流中にロータを設置しロータの回転により発電するというものである。海水は空気に比べて比重が大きいため海流のエネルギー密度は非常に大きく、そのため海流発電システムは風力発電に比べて小型にすることができ、コスト面等で有利だと考えられる。

本研究室では 2007 年より海流発電の検討を開始しており、初年度は黒潮の調査や基本設計など基礎的な研究を行った。本研究はその 3 年目に当たり、海流発電の発電用プラットフォームを設計する上で必要な海流発電用プラットフォームの動的応答解析プログラムを作成する。海流発電用プラットフォームの動的応答解析プログラムを作成することによって、海流中に設置した海流発電用プラットフォームの位置安定性、動揺特性、システム各部に発生する応力・変形等を求められるようにし、提案している海流発電用プラットフォームの構造解析について検討する。

1.1 地球温暖化

地球の気候の温暖化は大気中の温室効果ガスが、地表から宇宙空間へ逃げていく赤外線を吸収し、熱の放出を妨げるために起きる。

温室効果ガスには、二酸化炭素、フロン、メタン、亜酸化窒素、水蒸気など数多くの気体がある。二酸化炭素と水蒸気は特に代表的な温室効果ガスであり、現在の地球の平均的な気温 15℃はこれらの気体の温室効果によっている。二酸化炭素や水蒸気による温室効果がないとすると、地球は氷点下 18℃の酷寒の世界となってしまう。つまり温室効果ガスは地球の気候を温暖に保つためには不可欠なものである。しかしながらその濃度が極端に増加すると、温暖化が進みすぎ、灼熱の地球となる恐れがある。

大気中の二酸化炭素の濃度と地球の代表的な気温との関係は過去 16 万年前まで遡って調べられている。それによると、二酸化炭素濃度と気温の変化はたいへんよく似ており、二酸化炭素濃度が高いときは気温も高いことが明らかにされている。Fig.1-1 は南極の氷の中に閉じ込められた気泡の中のガスの分析から推定された二酸化炭素の濃度を示す。産業革命以前は 280ppm 程度であった濃度が、産業革命以降緩やかに増加し、1960 年頃から急激に増加に転じ、現在では 370ppm に達している。このまま増加してゆくと、21 世紀中頃には、産業革命以前の濃度の 2 倍、560ppm に達することになる。

この温室効果ガスである二酸化炭素の人為的な発生源の代表的なものは、石炭、石油な

ど炭素を含む化石燃料の燃焼である。工場、自動車、家庭などで燃料を燃やすと発生する。一年間に、世界全体で炭素に換算して約 70 億トンの二酸化炭素が放出されている。地球温暖化防止のためには、二酸化炭素などの排出量を削減する必要がある。気候温暖化防止のための国際的な検討グループである「気候変動に関する政府間パネル(IPCC)」の予測によると、大気中の温室効果ガスの濃度を現在のレベルに保つには、排出量を現在の 60%に削減する必要がある。現実にはこのような急激な削減は不可能であるが、政府は 1990 年に排出削減のための長期計画として「地球再生計画」を提案した。地球再生計画は今後 100 年をかけて、地球を産業革命以前の状態に戻すことを目標に、温暖化対策として有効なあらゆる技術を研究開発し、これを適用していこうとするものである。Fig.1-2、Fig.1-3 に地球再生計画の概念図を示す。次節では、環境問題を解決する上で大きな役割を担う再生可能エネルギーについて述べる。

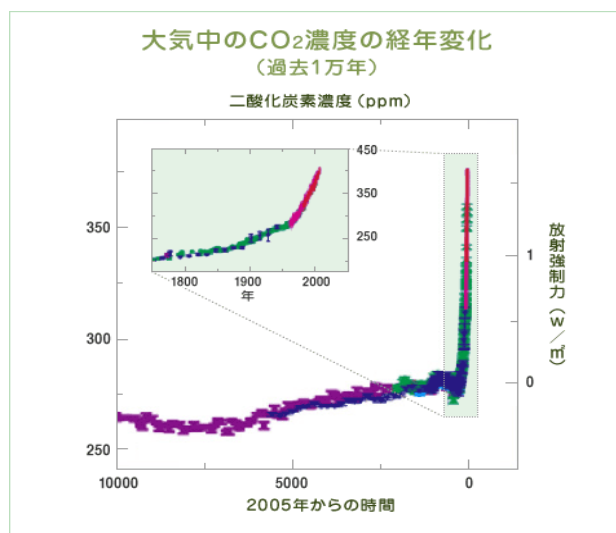


Fig.1-1 大気中の二酸化炭素濃度の経年変化[IPCC 第 4 次評価報告書 2007]

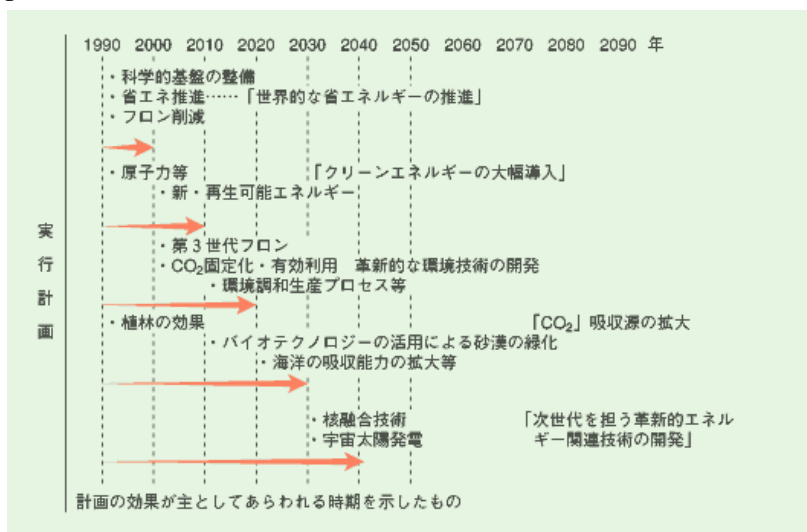


Fig.1-2 地球再生計画の概念図 1[IPCC,2007]

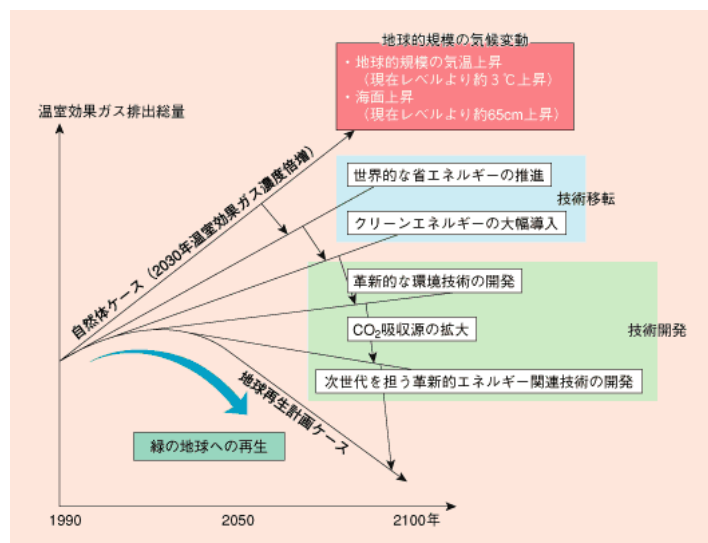


Fig.1-3 地球再生計画の概念図 2[IPCC,2007]

1.2 再生可能エネルギー

世界は今、化石エネルギー消費等に伴う温室効果ガスの排出量を大幅に削減し、世界全体の排出量を自然界の吸収量と同等レベルにするために、低炭素社会の構築に向かっている。再生可能エネルギーとは、「絶えず補充される自然のプロセスに由来するエネルギー」と定義されており、太陽光、風力、バイオマス、地熱、水力、海洋資源から生成されるエネルギーなどが含まれる。

Fig.1-4 に 2005 年日本の風力発電のロードマップを示す。2030 年に 2000 万 kW を目指している。その内 1300kW が洋上風力発電所である。Fig1-5 には、太陽光発電システム技術開発ロードマップの概要(NEDO 発表)を示す。まずは発電コストで 2002 年 50 円/kWh、2007 年に 30 円/kWh、2010 年に 23 円/kWh、2020 年には 14 円/kWh、2030 年は 7 円/kWh ということである。

風力や太陽光発電等が技術的に完成に近づいている現在、次代の再生エネルギーとして有力視されているのが海洋エネルギーである。海洋は地球表面の約 7 割を占め、海流や波浪、会表面と海底の温度差など、未利用の膨大なエネルギーを持っていると考えられ、それを利用するための技術の開発が盛んになってきているのである。1.3 では、海洋エネルギーに関して述べていく。

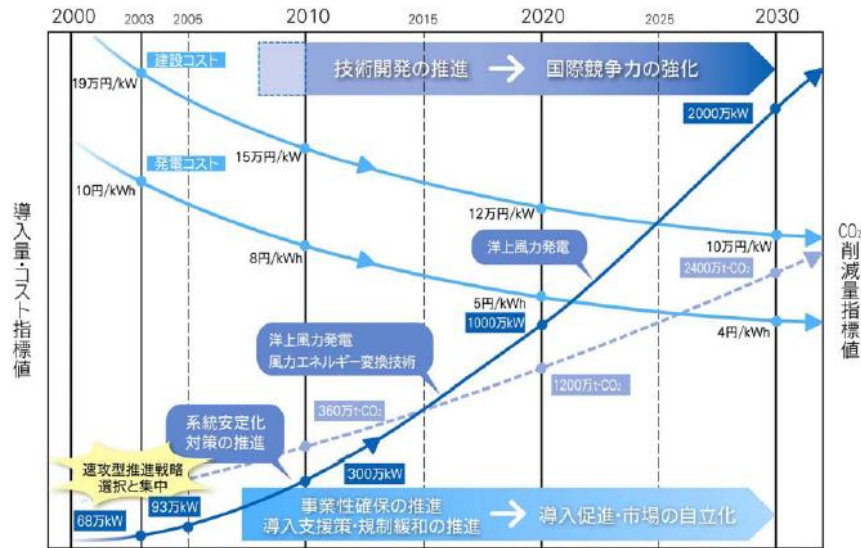


Fig.1-4 日本の風力発電のロードマップ [NEDO,2005]

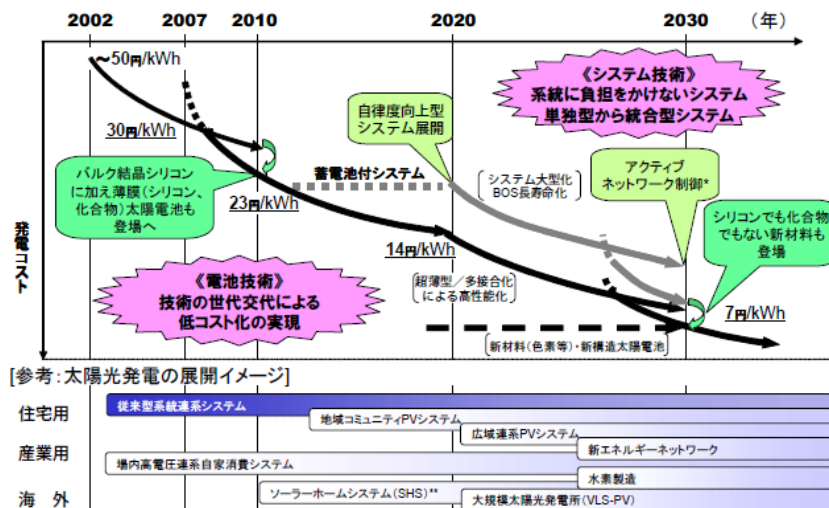


Fig.1-5 太陽光発電のロードマップ [NEDO]

1.3 海洋エネルギー

海洋エネルギーとは海水がもつエネルギーで、その種類としては潮汐、流れ、波、温度差、塩分濃度差の5種類がある。この他に海洋の空間で得られる自然エネルギーとして海上の風力、太陽、海中のバイオマスなどのエネルギーもあり、それらを広義の海洋エネルギーとして扱うこともある。Table.1-1は5種類の海洋エネルギーの特徴などをまとめたものである。

Table.1-1 海洋エネルギーの特徴

種類	エネルギーの特徴	発電適地
潮汐	地球と月、太陽と引力による海面の周期的な上下動、すなわち潮汐の位置エネルギー利用。	潮差が大きく口が狭い湾、入り江
海流・潮流	海流は地球規模の海水の密度や風の分布によるほぼ定常的な流れ。潮流は潮汐による水平な周期的な流れ。その運動エネルギーの利用。	流速が大きい湾口あるいは海峡
波	位置、運動の両エネルギーから成る。海の波の大半は海上を吹く風によって起こされ、エネルギーは周期が1～15秒に集中している。	年平均の波高が大きく、かつ大波が少ない海域
温度差	海の表面の温かい水と海底付近の冷たい水との水温の差のエネルギーを利用するもの。	表面水温が高い熱帯の海域
濃度差	海水と淡水の塩分濃度差のエネルギーの利用。	塩分濃度が高い海に注ぐ河口

・潮汐発電

世界初の潮汐発電所は、1966年完成のフランス電力公社のランス潮汐発電所(Fig.1-6)で、フランスのランス川河口を幅700mにわたってせき止めたもので出力は24万kW。最大潮位差13.5m、平均潮位差8.5mという恵まれた環境にある。2003年完成のクバルスン潮流発電所(ノルウェー)は水中タービン方式で直径10mのロータを設置している。

・海流、潮流発電

潮流発電は欧州の Marine Current Turbines 社によって開発が行われており、2003年完成のロータ直径11m、発電量300kwの Seaflow に続いて、2008年にはロータ直径16m、発電量1.2MW(2×600kw)の SeaGen(Fig.1-7)が完成し、実証試験が進んでいる。

海流発電は、海流を利用した発電方法で、その検討は1960年頃にも行われていたが、近年再び米国等で検討が始まっている。ロータによる発電という点で潮流発電と似ているが、海流の流路は水深が大きいため発電システムの設置方法などを検討しなおす必要がある。

・波力発電

海の波のエネルギーを利用しようとする試みは、日本でも多くの研究がなされ、特に1973年の中東戦争に伴う石油パニック以来、活発な技術開発が世界的に進められた。しかしながら、数十ワット級の航路標識用ブイの灯源としての空気タービンを除けば、経済性が低いとして商用電力としての実用化はしていなかった。近年、イギリス、ポルトガルで

500 k w級の実証実験が実施されている。Fig.1-8 は Ocean Power Delivery 社の Pelamis である。

・ 海洋温度差発電

海洋温度差発電の原理はフランスのダルソンバール(dArsonval)が 1881 年に提唱し、その後クロードが 1930 年に現地試験を行い、実証している。他の海洋エネルギーとは異なり、定常的な大出力が可能であることに特徴がある。現在は現地試験の段階であるが、実用化が期待されている。Fig.1-9 はダミル・ナドゥの海洋温度差発電の概念図である。

・ 塩分濃度差発電

海水は約 35%の塩分を有しており、淡水との間のこの塩分濃度の差はエネルギー換算すると約 240mの水頭差に相当する莫大な科学ポテンシャルがある。しかし、実験室での研究にとどまり、実用化されていない。

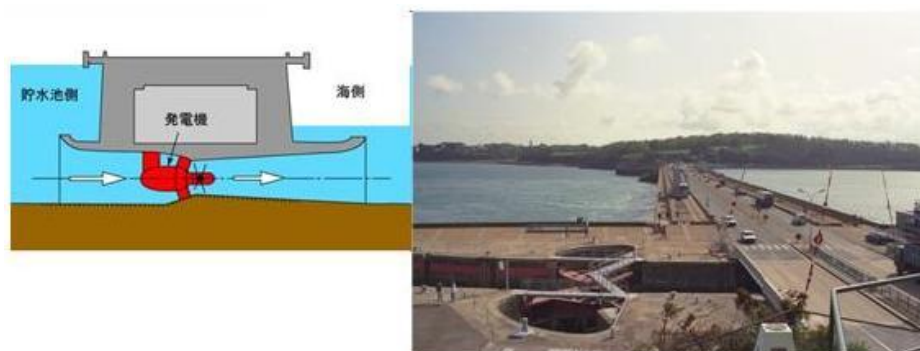


Fig.1-6 ランス潮汐発電所[フランス電力公社]

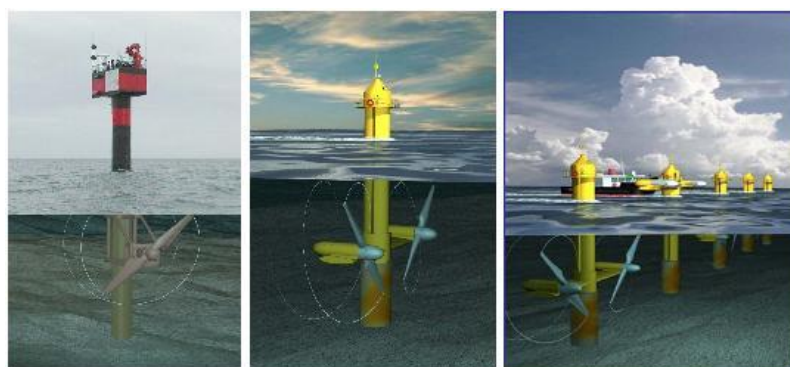


Fig.1-7 Sea Gen[Marine Current Turbines 社]



Fig.1-8 Pelamis[Ocean Power Delivery]

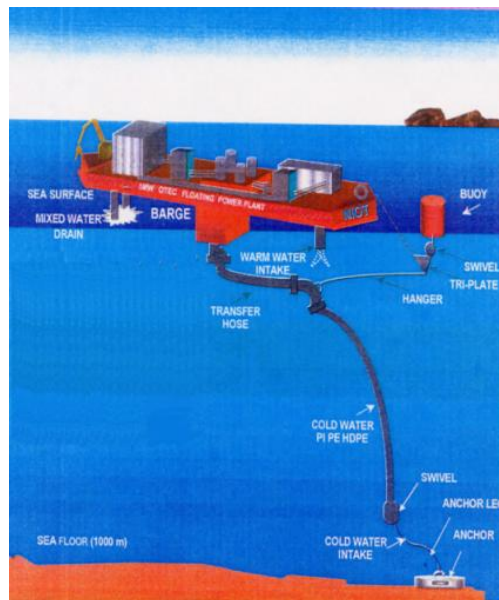


Fig.1-9 海洋温度差発電[ダミル・ナドゥ]

1.4 本研究における先行研究

2007年の鈴木研究室・早稲田研究室共同の応用プロジェクトにおいて、黒潮における海流発電に関する初期検討が行われた[1]。洋上構造物に関する研究を専門とする鈴木研究室と、海流や波に関する研究を専門とする早稲田研究室が協力し、海流発電用プラットフォームに関してそのプラットフォーム自体とプラットフォームを設置する海域の両面から検討を行った。

設置海域に関する調査には JCOPE データを使用し、海流の平均流速、流速の分散、水深、電気供給先などを考慮して適した海域を定め、その海域についてより詳細な流速変化を調

査された。プラットフォームは既存の風力発電や潮流発電を参考に、海流発電に固有の動揺や漂流などの問題をクリアするようなプラットフォームが考案された。さらに提案した海流発電用プラットフォームが、実際にどの程度の抵抗を受け、どのように動揺し、発生する内力にプラットフォームが耐えられるかを正確に評価するための動的応答解析プログラムの作成を試みた[2]。

1.4.1 設置海域に関する調査

海流発電に適した海域の条件を下に挙げる。

- ・平均流速が速い
- ・流速が安定している
- ・黒潮大蛇行の影響が小さい
- ・水深が大きくない(1000m より浅い)
- ・電力消費地が近い

黒潮は幅 100km、深さ 500m、流速は速いところで 2m/s を超す膨大な流れであるから、エネルギー源としてのポテンシャルは非常に大きい。

流速予測には、海洋技術研究開発機構による日本沿海予測実験計画(JCOPE)の海流再解析データが用いられた。JCOPE では、日本近海の海洋データを 2 日ごとの予測値と再解析値で提供している。この JCOPE データを用いて、上に挙げたような条件を満たす海域に関する検討の結果、候補にあがったのは紀伊半島沖、四国沖、三宅島沖の 3 海域である。このうち、より有望と考えられた紀伊半島沖と三宅島沖の 2 海域がより有望と考えられる。

紀伊半島南端	:	緯度 33.3	経度 135.8	水深 1000m
三宅島沖	:	緯度 34	経度 139.7	水深 1000m

1.4.2 プラットフォームに関する検討

海流発電用プラットフォームに求められる性能を下に挙げる。

- ・低動揺性
- ・位置安定性(上下方向、水平方向)
- ・海流中での抵抗が小さい
- ・建造、運搬、曳航、設置、移動の容易さ。
- ・保守、点検の容易さ

これらの性能を満たすものとして考案されたのが、Fig.1-10 のような一本係留の骨組構造を使用した海流発電用プラットフォームである。

このプラットフォームの特徴として、以下のことが挙げられる。

- ・中間ブイを用いた一本係留の浮体式システム

一本係留としているのはプラットフォームが海流に流されることによって安定するからである。中間ブイを使用しているのは海流に流されたときに水面下に沈まないようにするためであり、常に水面に位置することで上下運動の安定性を確保することができる。

- ・骨組構造が海面を貫通

骨組構造が海面を貫通するようにしているのは上下方向の安定を保つためである。発電用プラットフォームを水面下に設置した場合、浮力と重量が釣り合って上下方向に不安定となるため上下の動きを制御する機構が必要になる。このような制御機構は故障の危険があるためなるべく使用しない方が良いと考え、プラットフォームは海面に設置することとした。

- ・一つの骨組構造に複数のロータを搭載

一つの骨組構造に複数のロータを搭載しているのは海流に対する水平方向の安定性を確保するためである。ロータの後流による干渉効果についても検討していく必要がある。

- ・細い要素による骨組構造

細い要素を使用した骨組構造としたのは、搭載するロータと発電機のサイズと重量が小さいためである。海上リグ等の巨大な浮体構造物の場合、細い骨組構造を用いると、施工上の小さなミスなどから応力集中が起こって破壊し、大事故が発生する危険性が大きい。そのため、現在では少数の太い要素を組み合わせた浮体構造物が主流となっている。しかし、本研究の海流発電システムの場合、ロータ直径 24m の小型発電機で重量は大きくないため、細い要素の骨組構造を使用できると考えた。これによって、海流中に設置したときに発生する抗力を小さくすることができる。

- ・骨組に楕円柱を使用

海流発電用プラットフォームの設計において抗力は重大な問題である。ロータや係留システム等の強度を確保しなければならないと同時に、その抗力をできる限り小さくすることも重要である。そのために、本研究で提案している海流発電用プラットフォームは骨組構造を使用しており、さらにその骨組の一部に楕円柱部材の使用を検討している。骨組に楕円柱を使用することによって、海流に対する骨組構造の投影面積を減らし海流に対するプラットフォーム全体の抗力を小さくすることが狙いである。

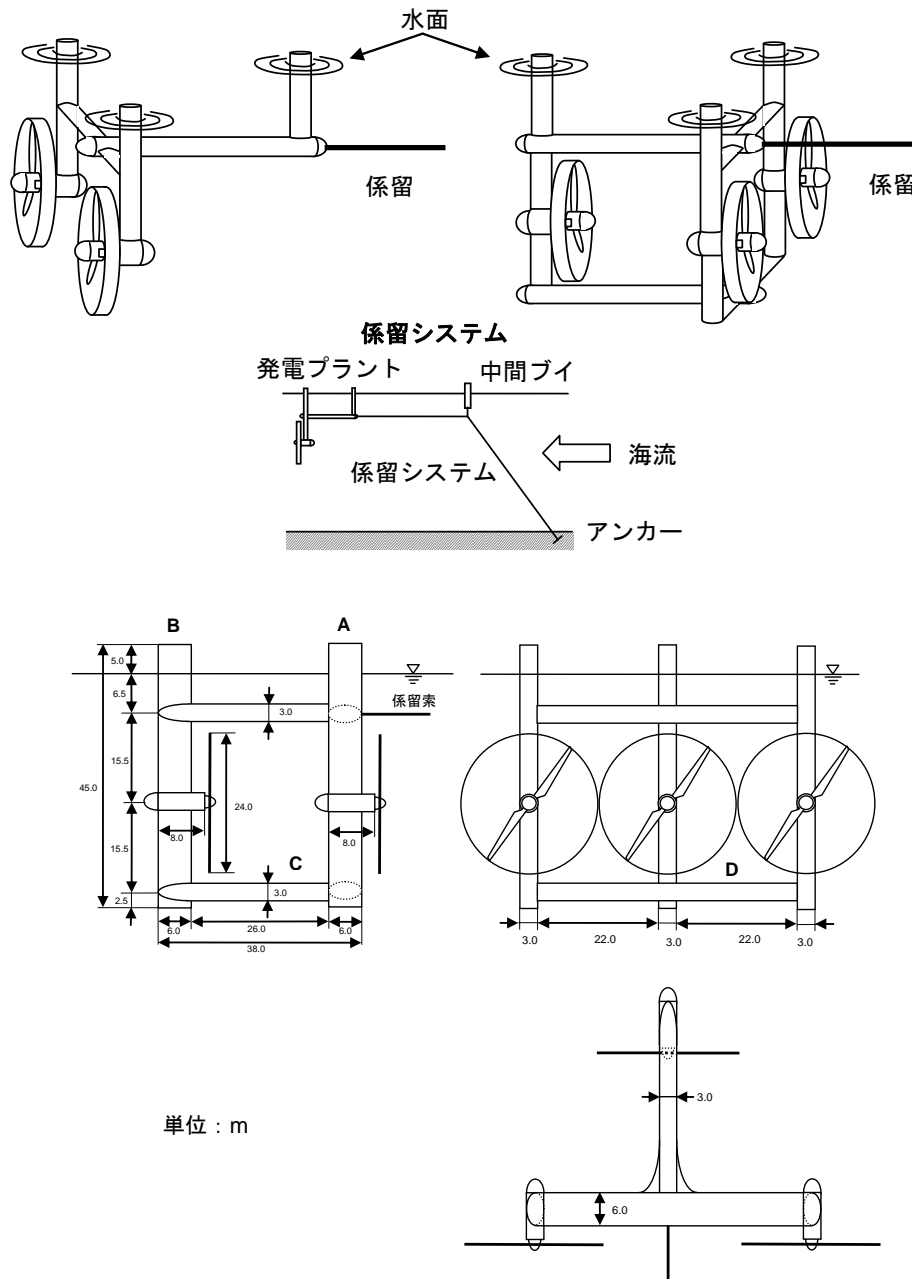


Fig.1-10 本研究室で提案している海流発電用プラットフォーム [1]

1.4.3 海流発電用プラットフォームの動的応答解析

現在提案している海流発電用プラットフォームが、実際に海流中に設置した時、どの程度の抵抗を受け、どのように動揺し、発生する内力にプラットフォームが耐えられるかを正確に評価するためには、コンピュータシミュレーションを行う必要がある。

必要な機能は、海流発電用プラットフォームを海流の流路に係留した際のプラットフォ

ームの各部位に発生する変位、応力等を評価し、海流中でのプラットフォームの挙動を調べることである。海流発電システムの各部に発生する流体力を求め、それによって構造物に発生する応力や挙動を計算するためには膨大な数値計算が必要となるため、パソコンを使用したシミュレーションを行うことになる。本研究における海流発電用プラットフォームは Fig.1-10 のような骨組構造となっているが、骨組構造のパソコンによる解析法としては、有限要素法(Finite Element Method)が一般的である。有限要素法は、船舶や航空機、建築などさまざまな構造物の設計において使用される数値計算法である。

構造解析の分野における有限要素法は、複雑な構造物を小さな要素の集合体として、静的解析の場合は $Kx=F$ の一次方程式を各節点の変位について境界条件を代入して解く。対象の構造に外力が加わって変形する場合等を解析する際、構造解析法には大きく分けて変位を未知数にとる変位法と応力を未知数にとる応力法があるが、有限要素構造解析では変位法が主流である。応力法に比べてアルゴリズムが機械的に実行できプログラミングに適しているためである。現在では、航空機、船舶、自動車等の構造解析に幅広く用いられている。

本研究で作成する有限要素法プログラムは骨組構造を対象としているため、発電システムの骨組構造を細長い梁要素を組み合わせたものとみなして、有限要素法による動的応答解析プログラムを開発した。具体的には、振動および応答解析入門[7]に掲載されているプログラムを参考にして骨組構造の剛性行列と質量行列を作成し、モリソン式をベースとした流体力評価によって導いた外力ベクトルと併せて運動方程式に代入し、時間領域で運動方程式を解き、時刻歴の変位と応力を求める。海流発電用プラットフォームの骨組情報、波と流れの情報を入力して骨組構造の各部の変位とそこに発生する応力を時間領域で計算する非線形時刻歴解法である (Fig.1-11)。

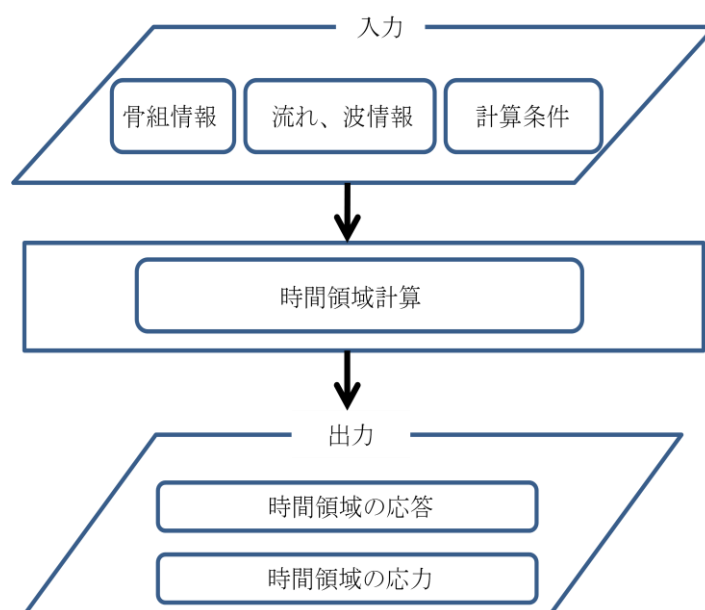


Fig.1-11 海流発電用プラットフォームの動的応答解析プログラムの機能

1.4.4 海流発電用プラットフォームの流体力評価

動的応答解析プログラムの作成において、外力ベクトルを求めるために骨組要素に発生する流体力を評価する必要がある。浮体構造物の流体力評価を行うとき、波と流れの構造物への影響はその構成要素に発生する全ての荷重ベクトルの重ね合わせとして得られる。流体力を計算するためには、構造物の表面における圧力場を求める必要がある。構造物の要素に発生する主な荷重としては質量力や粘性抵抗、ラディエーション力などがあるが、構造要素の直径と海洋波の波長の比 (D/L) や、海洋波の波高との比 (H/D) の値によって、そのどれが支配的になるかが決まってくる (Fig1-12)。

構造物直径が波長と比べて小さく ($D/L < 0.2$)、構造物が波に大きな影響を与えない場合は、モリソン式を使用して質量力や抗力を求めることができる。逆に、構造物直径が大きい場合はラディエーション力の影響が大きくなるため、ポテンシャル理論による計算を行う必要がある。Fig-13 は海洋波の波スペクトルである。外洋の深海域に対してはピアソン・モスコビッツ型、浅海域ではジョンスワップ型が使用されるのが一般である。これによると深海波の角周波数 ω は $0.3 \sim 1.0 \text{ rad/sec}$ 程度であるから、波長は $50 \sim 600 \text{ m}$ 程度である。本研究の海流発電システムの場合骨組要素の直径は $3 \sim 8 \text{ m}$ 、流体力評価の基準値である $\pi D/L$ は最大でも 0.5 未満であるから、Fig.1-12 よりモリソン式が適用でき慣性力が支配的になるということがわかる。

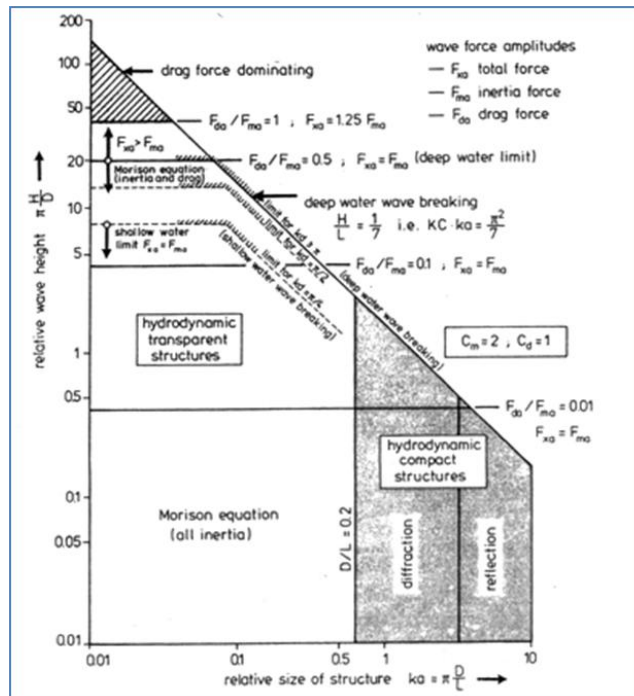


Fig.1-12 円柱構造の水平荷重評価法の分類と使用条件 [3]

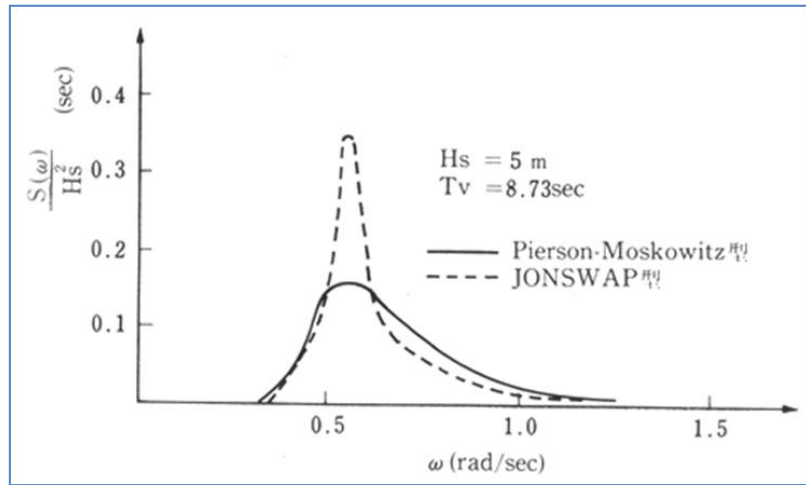


Fig.1-13 波スペクトルの比較 [4]

ここで、流体力評価に使用するモリソン式について説明する。モリソン式は元来固定の鉛直杭に作用する波浪荷重を計算する式であるが、波の中で運動する細長い形状の浮体に対しては式 1-1 で表わされる。第 1、2 項は質量力を、第 3 項は粘性による抗力を示す。

$$df = \rho_w A \dot{u} dz + (C_M - 1) \rho_w A (\dot{u} - \dot{x}) dz + 1/2 \rho_w C_D D (u - \dot{x}) |u - \dot{x}| dz \quad 1-1-1$$

ρ_w : 海水の密度

df : dz の長さの浮体に作用する部材直交方向の荷重

C_M : 質量係数 (mass coefficient、断面形状によって決まる係数)

C_D : 抗力係数(drag coefficient、同上)

u 、 \dot{u} : 波による水粒子の速度、加速度の部材直交方向成分

\dot{x} 、 \ddot{x} : 浮体部材の速度、加速度の部材直交方向成分

D : 浮体部材の断面に関する代表寸法

A : 浮体部材の断面積

浮体式海流発電の場合、浮体構造は常に海流中にあるため一定の流れを受け続ける。さらに海流のほかに風波の影響も受けるため、流体速度と流体加速度どちらの影響も考慮する必要がある。本研究では、一様流と波の重ね合わせから流体粒子の速度成分と加速度成分を読み取り、それぞれが発生させる荷重について評価する。すなわち、流体速度の 2 乗に比例する荷重 (抗力) と流体加速度に比例する荷重 (質量力) とに分けて計算する。

また、本研究の海流発電用プラットフォームでは骨組構造要素に楕円柱を使用しているため、モリソン式の荷重に加えて揚力が発生する。よって、流体速度の2乗に比例する荷重としては抗力と揚力の両方を評価する必要がある。

1.4.5 先行研究の進捗具合

先行研究では海流中に設置した海流発電用プラットフォームの位置安定性、動揺特性、プラットフォーム各部に発生する応力・変形等を予測できるようにするために海流発電用プラットフォームの動的応答解析プログラムの作成を試みたが、完成までは至らなかった (Fig. 1-14)。

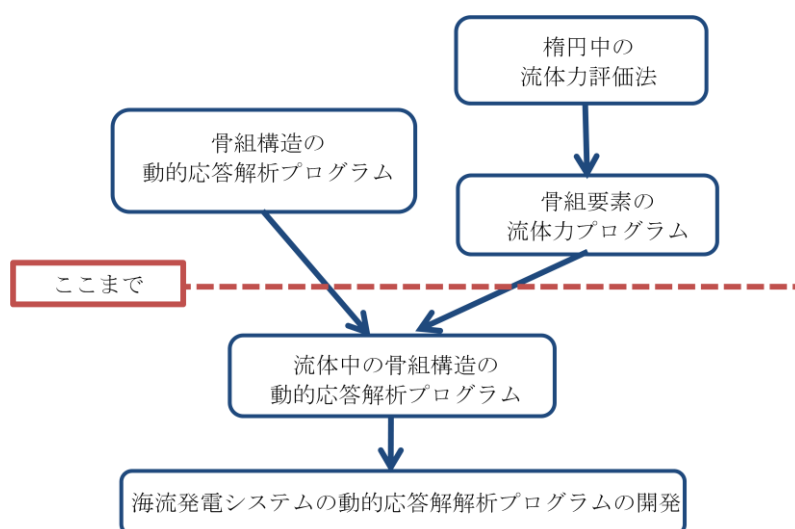


Fig.1-14 プログラムの開発状況

2. 研究の目的と方法

本研究の目的は、海流発電用プラットフォームの動的応答解析プログラムの作成と提案している海流発電用プラットフォームの技術的成立性についての検討である。コンピュータシミュレーションによって、海流中に設置した海流発電用プラットフォームの位置安定性、動揺特性、システム各部に発生する応力・変形等を予測(計算)できるようにし、現在提案している海流発電用プラットフォームのロータ配置・浮体形状の最適化や、各部材に必要な強度の計算など、基本設計において重要な作業がより正確に行えるようにする。

本研究では、まず、有限要素法による海流発電用プラットフォームの動的応答解析プログラムを作成する。その後、作成したプログラムを用いて、提案している海流発電用プラットフォームの強度計算を行い、技術的成立性について検討する(Fig.2-1)。

抵抗の計算、プラットフォームの動揺計算、プラットフォーム各部に発生する応力の計算などを同時に行う手法として、有限要素法が有効である。有限要素法は、海流発電用プラットフォームの骨組構造を適当な数の骨組要素に分割し、骨組要素に発生する荷重から骨組各部の変位や内力を計算することができる。

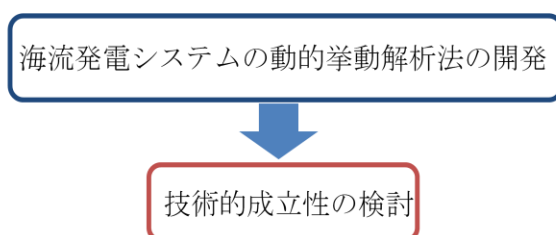


Fig.2-1 研究の流れ

2.1 研究の手順

2.1.1 海流発電の動的応答解析プログラムの作成

作成するプログラムは、海流発電用プラットフォームの骨組情報、波と流れの情報を入力して骨組構造の各部の変位とそこに発生する応力を時間領域で計算するものである(Fig.2-2)。

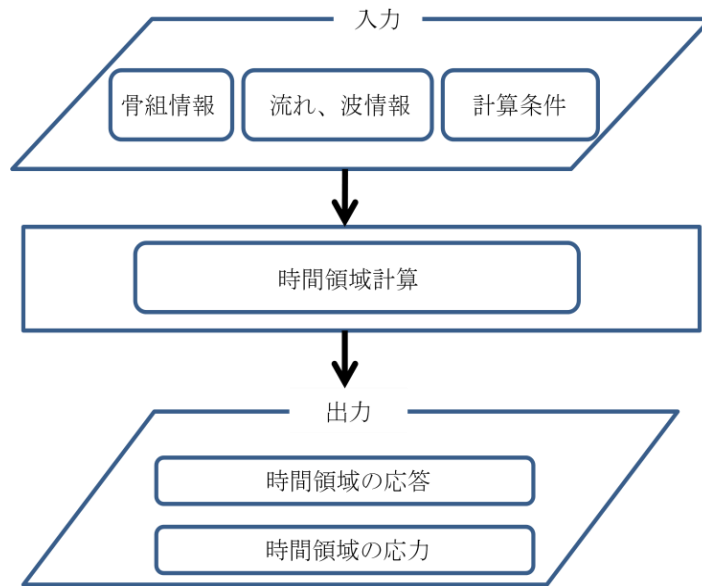


Fig.2-2 海流発電用プラットフォームの動的応答解析プログラムの機能

本研究で作成する有限要素法プログラムは骨組構造を対象としているため、プラットフォームの骨組構造を細長い梁要素を組み合わせたものとみなして、有限要素法による動的応答解析プログラムを作成した。骨組構造の剛性行列と質量行列を作成し、流体力評価によって導いた外力ベクトルと併せて運動方程式に代入し、時間領域で運動方程式を解き、時間領域の変位と応力を求める。プログラムは非線形時間領域解析法を用いている。Fig.2-3は、作成する応答解析プログラムのフローである。

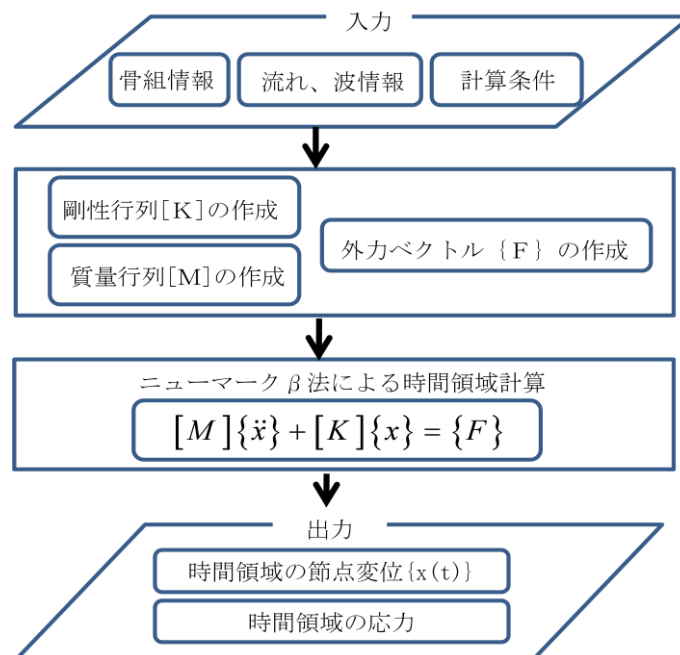


Fig.2-3 海流発電用プラットフォームの動的応答解析プログラムのフロー

2.1.2 海流発電用プラットフォームの流体力評価

波浪中の円柱に働く荷重はモリソン式

$$dF_x = f_0 dz = (f_m + f_d) dz = C_m \rho \frac{\pi D^2}{4} dz \frac{\partial u}{\partial t} + C_d \frac{\rho}{2} D dz |u| u \quad 2-1$$

で表わされ、このうち流体粒子の速度成分による荷重は抗力である。よって円柱の場合速度成分による荷重を求めるためには抗力係数を求めさえすればよい。

しかし提案している海流発電用プラットフォームに骨組要素は楕円柱を用いている。楕円柱の場合は抗力に加えて揚力が発生し、その大きさは流れと楕円柱がなす角度によっても変化する。楕円柱半径が流れと垂直な場合の抗力係数については Fig.2-4 を使って推定することができるが、楕円柱半径が流れと垂直でない場合の抗力係数はデータがない。楕円柱の揚力に到ってはデータがほとんど存在しない状態であり、計算によって求めることができない。そのため楕円柱の曳航実験を行い、楕円柱の揚力係数と抗力係数を求める。

本研究で採用する骨組構造について流体力評価はモリソン式によって行えることが予想されるが、実際にはロータによる流れへの干渉があるため、海流発電操業時の流体力評価は正確には行えない可能性がある。よってロータと部材間の相互干渉効果を評価するための実験を行う。

また、本研究のプログラムの流体力評価では浮力と重力を流体力として考慮している。

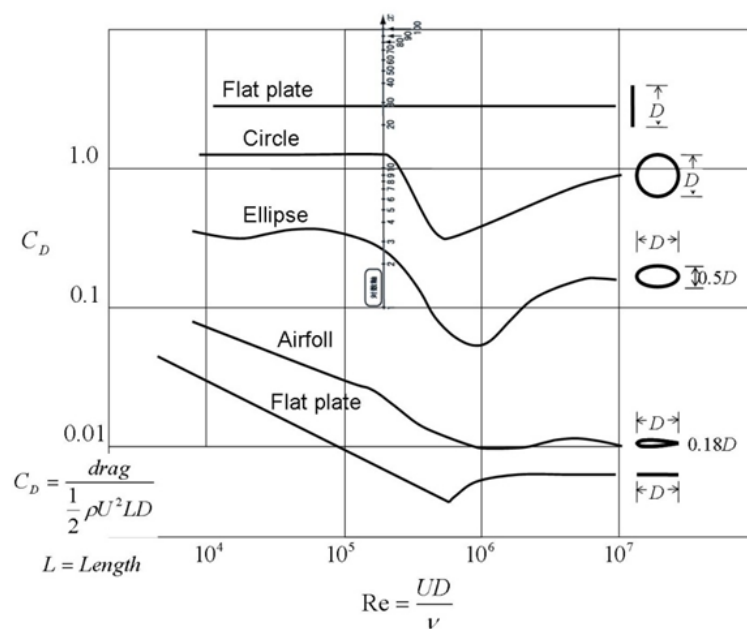


Fig.2-4 抗力係数とレイノルズ数の関係(Electrathon Vehicle Construction Site データより作成)

2.1.3 海流発電用プラットフォームの模型実験

海流発電用プラットフォームの50分の1模型を使用し、波浪中の動揺測定実験を行った。

本実験の目的は、作成した海流発電用プラットフォームの動的応答解析プログラムの妥当性の評価である。本研究の海流発電用プラットフォームの動的応答解析プログラムにおいて、骨組構造に働く流体力はモリソン式ベースで評価しているが、これは骨組要素が波に与える影響を考慮していない。すなわち、実際には海流発電用プラットフォームの前面を通過した波はプラットフォーム前面の骨組要素による影響で変化しており、それによりプラットフォーム後方の骨組要素に生じる流体力は実際には変化しているが、本研究ではその変化が十分に小さく応答解析に影響を与えることはないと判断して変化を無視しているのである。模型実験による動揺測定と動的応答解析プログラムによる動揺計算が同じ結果となれば、海流発電用プラットフォームの流体力評価はモリソン式によって妥当な結果が得られるということになり、海流発電用プラットフォームの動的応答解析プログラムは完成したと言える。

2.1.4 海流発電用プラットフォームの技術的成立性の検討

海流発電用プラットフォームの動的応答解析プログラムが完成したら、提案している海流発電用プラットフォームを海流の流路に係留した際のプラットフォームの各部位に発生する応力を計算し、海流中でのプラットフォームの挙動を調べる。そして提案している海流発電用プラットフォームの技術的成立性について検討する。

3. 海流発電の動的応答解析プログラム

海流発電用プラットフォームの動的応答解析プログラムの作成について述べる。海流中に設置した海流発電用プラットフォームの位置安定性、動揺特性、プラットフォーム各部に発生する応力・変形等を計算するために有限要素法による浮体式骨組構造物の時間領域の動的応答解析プログラムを作成した。Fig.3-1 は海流発電用プラットフォームに有限要素法を適用する際の骨組構造の要素分解の例である。

海流発電用プラットフォームの動的応答解析プログラムの作成は、まず骨組構造物の動的応答解析プログラムとモリソン式をベースとした流体力プログラムを組み合わせることで浮体式骨組構造物の動的応答解析プログラムを作成し(Fig.3-2)、その後模型実験を行い、プログラム値と実験値を比較し、プログラムの妥当性を確認するという手順で行う。本章では海流発電用プラットフォームの骨組構造物の動的応答解析プログラムについて説明し、次章で模型実験について説明する。

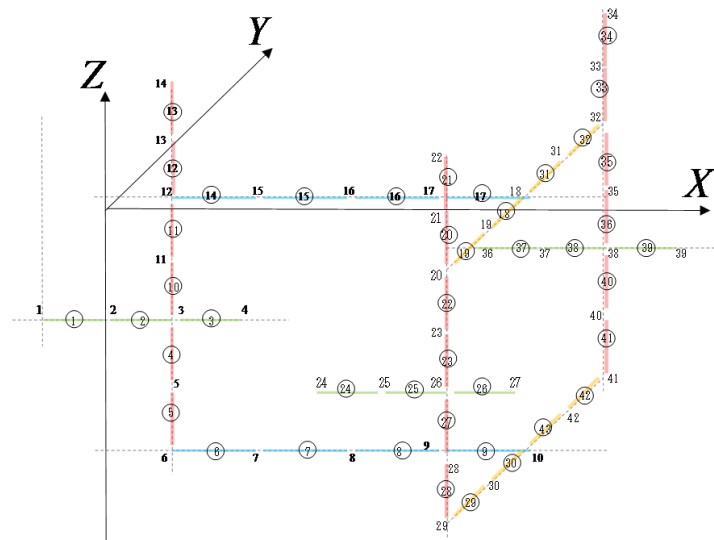


Fig.3-1 海流発電用プラットフォームの要素分割例[2]

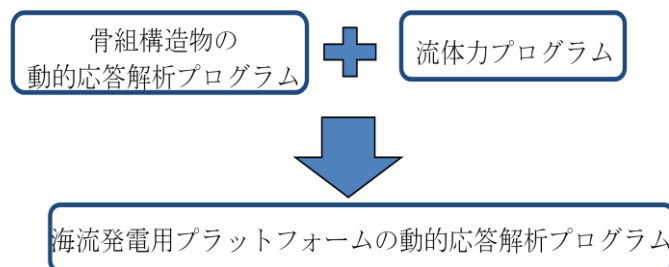


Fig.3-2 海流発電用プラットフォームの動的応答解析プログラムの作成フロー

3.1 骨組構造物の動的応答解析プログラム

骨組構造物について、有限要素法による動的応答解析プログラムを作成する。有限要素法プログラムは振動および応答解析入門 [7]を参考に作成した。

作成する動的応答解析プログラムは、入力した骨組情報から剛性行列と質量行列を作成し、外力ベクトルを入力し、ニューマーク β 法を用いた時間領域計算によって骨組各部の変位と応力の値を得る非線形時刻歴解法である (Fig.3-3)。

このプログラム作成は

- ・二次元トラスの静的応答解析プログラムの作成
 - ・三次元骨組構造物の動的応答解析プログラムの作成
- という手順で行った。

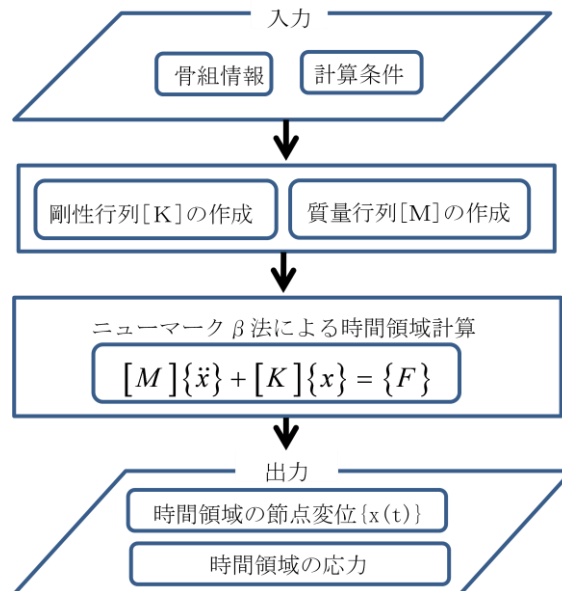


Fig.3-3 海流発電用プラットフォームの動的応答解析プログラムのフロー

3.1.1 二次元トラスの静的応答解析プログラムの作成

有限要素法を用いた二次元トラスの静的応答解析プログラムを作成した。

構造の節点数、要素数、節点座標、接続情報、材料情報、拘束条件、荷重情報を入力すると節点変位解、応力解が得られるプログラムである(Fig.3-4)。

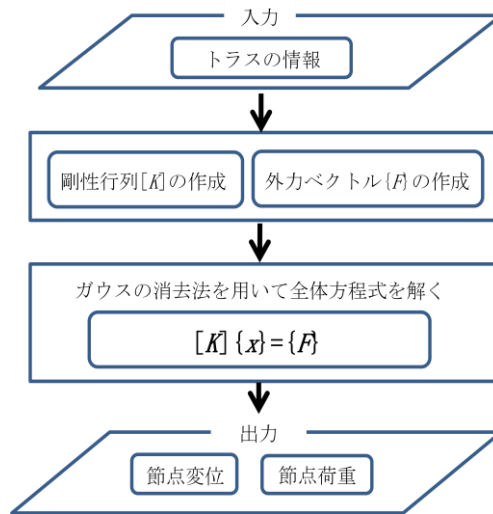


Fig.3-4 二次元トラスの静的解析プログラムのフロー

3.1.1.1 二次元トラスの静的解析プログラムの計算例

二次元トラスの静的解析プログラムの計算結果を以下に示す。

例として Fig.3-5 のようなトラスの計算をする場合、Fig.3-6 のように番号付けをし、Fig.3-7 のような情報を用意する。

まずトラスの情報として総節点数、総要素数、次に要素ごと両端の節点番号、各節点の座標を入力。次に要素の材料情報を入力する。材料情報としては、ヤング係数、断面積を入力する。次に荷重条件を入力し、最後に拘束条件を入力する。

Fig.3-8 が計算結果である。各節点の X 座標、Y 座標の変位と各要素の応力を出力させ、正しく計算されていることを確認した。

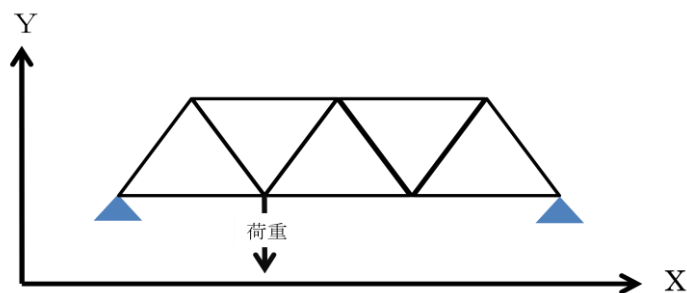


Fig.3-5 解析したトラスの図

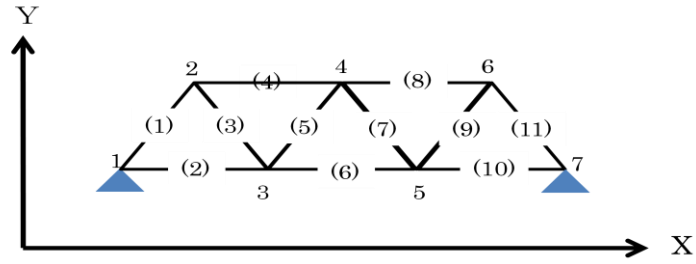


Fig.3-6 トラスの番号付け

節点数	要素数	
7	11	
要素両端の節点番号		
要素番号	節点番号1	節点番号2
1	1	2
2	1	3
3	2	3
4	2	4
5	3	4
6	3	5
7	4	5
8	4	6
9	5	6
10	5	7
11	6	7
節点の座標		
節点番号	X座標	Y座標
1	0	0
2	5	7.07
3	10	0
4	15	7.07
5	20	0
6	25	7.07
7	30	0
材料情報		
ヤング率	断面積	
2.0E+5	2	
荷重節点番号	荷重の X成分	荷重の Y成分
3	0	-1000
固定番号		
1	7	

Fig.3-7 プログラムの入力情報

節点番号, X, Y			要素番号, 応力, 軸力		
1	0.0000E+00	0.0000E+00	1	-408.2482	-816.4964
2	0.2161E-01	-0.3693E-01	2	1.0722089E-05	2.1444179E-05
3	0.5361E-09	-0.7386E-01	3	408.2482	816.4964
4	-0.1964E-02	-0.6164E-01	4	-471.4044	-942.8088
5	0.5893E-02	-0.4526E-01	5	204.1241	408.2482
6	-0.1375E-01	-0.2055E-01	6	117.8511	235.7022
7	0.0000E+00	0.0000E+00	7	-204.1241	-408.2482
			8	-235.7021	-471.4043
			9	204.1241	408.2482
			10	-117.8511	-235.7022
			11	-204.1241	-408.2482

Fig.3-8 計算結果

3.1.2 三次元骨組構造物の動的応答解析プログラム

ニューマーク β 法を用いた三次元骨組構造物の動的応答解析プログラムを作成した。

骨組情報として、三次元骨組構造物の総節点数、総要素数、節点座標、接続情報、材料情報、境界条件を入力し剛性マトリクス[K]、質量マトリクス[M]を作成しニューマーク β 法によって時刻歴の応答を求めることができる(Fig.3-9)。以下に剛性マトリクス、質量マトリクスとニューマーク β 法、レーレー減衰の説明をする。

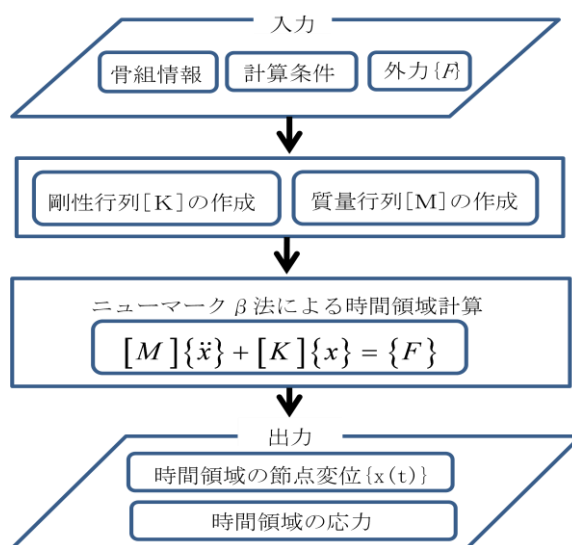


Fig.3-9 三次元骨組の動的応答解析のプログラムのフロー

3.1.2.1 三次元骨組構造物の剛性マトリクス、質量マトリクス

動的な応答解析を行うためには、剛性マトリクスだけではなく質量マトリクスが必要である。そこで、二次元トラスの静的応答解析プログラムを三次元に拡大し、質量マトリクス作成サブルーチンを組み込んで骨組情報から全体剛性マトリクスと全体質量マトリクスを作成するプログラムを作成した。

Fig.3-10 と Fig.3-11 は骨組要素の座標軸を表わしている。ここでは、楕円柱要素の長径方向を x 軸、短径方向を y 軸、要素軸方向を z 軸としている。

剛性行列で使う y 軸回りの断面二次モーメントは

$$I_y = \frac{\pi}{4} \left[R_x^3 R_y - (R_x - 2t)^3 (R_y - 2t) \right]$$

で表わされ、x 軸回りの断面二次モーメントは

$$I_x = \frac{\pi}{4} \left[R_y^3 R_x - (R_y - 2t)^3 (R_x - 2t) \right]$$

で表わされる。

これにより、3次元梁の要素剛性マトリクス、要素質量マトリクスは Fig.3-12.Fig.3-13.Fig.3-14 で表される。それぞれについて要素マトリクスを要素座標系から全体座標系に座標変換して重ね合わせると、全体剛性マトリクスと全体質量マトリクスができる。

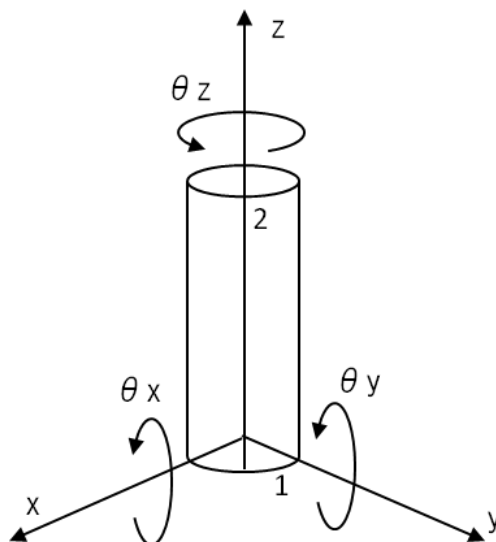


Fig.3-10 楕円柱骨組要素の座標軸 1

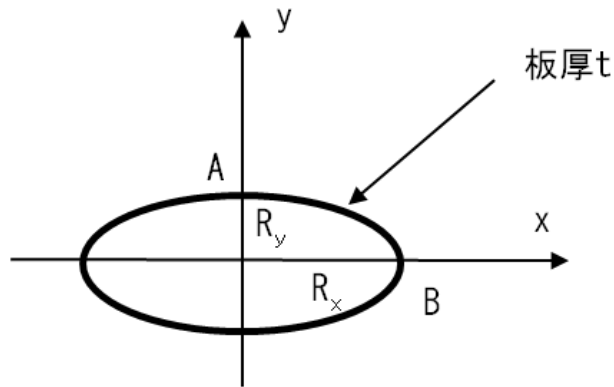


Fig.3-11 楕円柱骨組要素の座標軸 2

	u_{1x}	u_{1y}	u_{1z}	θ_{1x}	θ_{1y}	θ_{1z}	u_{2x}	u_{2y}	u_{2z}	θ_{2x}	θ_{2y}	θ_{2z}
F_{1x}	$\frac{12EI_y}{L^3}$				$\frac{6EI_y}{L^2}$		$-\frac{12EI_y}{L^3}$				$\frac{6EI_y}{L^2}$	
F_{1y}		$\frac{12EI_x}{L^3}$		$-\frac{6EI_x}{L^2}$				$-\frac{12EI_x}{L^3}$		$-\frac{6EI_x}{L^2}$		
F_{1z}			$\frac{EA}{L}$						$-\frac{EA}{L}$			
T_{1x}		$-\frac{6EI_x}{L^2}$		$\frac{4EI_x}{L}$				$\frac{6EI_x}{L^2}$		$\frac{2EI_x}{L}$		
T_{1y}	$\frac{6EI_y}{L^2}$				$\frac{4EI_y}{L}$		$-\frac{6EI_y}{L^2}$				$\frac{2EI_y}{L}$	
T_{1z}						$\frac{GJ}{L}$						$-\frac{GJ}{L}$
F_{2x}	$-\frac{12EI_y}{L^3}$				$-\frac{6EI_y}{L^2}$		$\frac{12EI_y}{L^3}$				$-\frac{6EI_y}{L^2}$	
F_{2y}		$-\frac{12EI_x}{L^3}$		$\frac{6EI_x}{L^2}$				$\frac{12EI_x}{L^3}$		$\frac{6EI_x}{L^2}$		
F_{2z}			$-\frac{EA}{L}$						$\frac{EA}{L}$			
T_{2x}		$-\frac{6EI_x}{L^2}$		$\frac{2EI_x}{L}$				$\frac{6EI_x}{L^2}$		$\frac{4EI_x}{L}$		
T_{2y}	$\frac{6EI_y}{L^2}$				$\frac{2EI_y}{L}$		$-\frac{6EI_y}{L^2}$				$\frac{4EI_y}{L}$	
T_{2z}						$-\frac{GJ}{L}$						$\frac{GJ}{L}$

Fig.3-12 剛性マトリクス

$(\times \rho)$	\ddot{u}_{1x}	\ddot{u}_{1y}	\ddot{u}_{1z}	$\ddot{\theta}_{1x}$	$\ddot{\theta}_{1y}$	$\ddot{\theta}_{1z}$	\ddot{u}_{2x}	\ddot{u}_{2y}	\ddot{u}_{2z}	$\ddot{\theta}_{2x}$	$\ddot{\theta}_{2y}$	$\ddot{\theta}_{2z}$
F_{1x}	$\frac{13AL}{35}$				$\frac{11AL^2}{210}$		$\frac{9AL}{70}$				$-\frac{13AL^2}{420}$	
F_{1y}		$\frac{13AL}{35}$		$-\frac{11AL^2}{210}$				$\frac{9AL}{70}$		$\frac{13AL^2}{420}$		
F_{1z}			$\frac{AL}{3}$						$\frac{AL}{6}$			
T_{1x}		$-\frac{11AL^2}{210}$		$\frac{AL^3}{105}$				$-\frac{13AL^2}{420}$		$-\frac{AL^3}{140}$		
T_{1y}	$\frac{11AL^2}{210}$				$\frac{AL^3}{105}$		$\frac{13AL^2}{420}$				$-\frac{AL^3}{140}$	
T_{1z}						$\frac{JL}{3}$						$\frac{JL}{6}$
F_{2x}	$\frac{9AL}{70}$				$\frac{13AL^2}{420}$		$\frac{13AL}{35}$				$-\frac{11AL^2}{210}$	
F_{2y}		$\frac{9AL}{70}$		$\frac{13AL^2}{420}$				$\frac{13AL}{35}$		$\frac{11AL^2}{210}$		
F_{2z}			$\frac{AL}{6}$						$\frac{AL}{3}$			
T_{2x}		$\frac{13AL^2}{420}$		$-\frac{AL^3}{140}$				$\frac{11AL^2}{210}$		$\frac{AL^3}{105}$		
T_{2y}	$-\frac{13AL^2}{420}$				$-\frac{AL^3}{140}$		$-\frac{11AL^2}{210}$				$\frac{AL^3}{105}$	
T_{2z}						$\frac{JL}{6}$						$\frac{JL}{3}$

Fig.3-13 部材質量による質量マトリクス

$(\times \rho_f)$	\ddot{u}_x	\ddot{u}_y	\ddot{u}_z	$\ddot{\theta}_x$	$\ddot{\theta}_y$	$\ddot{\theta}_z$	\ddot{u}_{2x}	\ddot{u}_{2y}	\ddot{u}_{2z}	$\ddot{\theta}_{2x}$	$\ddot{\theta}_{2y}$	$\ddot{\theta}_{2z}$
F_{1x}	$C_{ax} \frac{13AL}{35}$				$C_{ax} \frac{11AL^2}{210}$		$C_{ax} \frac{9AL}{70}$				$-C_{ax} \frac{13AL^2}{420}$	
F_{1y}		$C_{ay} \frac{13AL}{35}$		$-C_{ay} \frac{11AL^2}{210}$				$C_{ay} \frac{9AL}{70}$		$C_{ay} \frac{13AL^2}{420}$		
F_{1z}			V_a						V_a			
T_{1x}		$-C_{ay} \frac{11AL^2}{210}$		$C_{ay} \frac{AL^3}{105}$				$-C_{ay} \frac{13AL^2}{420}$		$-C_{ay} \frac{AL^3}{140}$		
T_{1y}	$C_{ax} \frac{11AL^2}{210}$				$C_{ax} \frac{AL^3}{105}$		$C_{ax} \frac{13AL^2}{420}$				$-C_{ax} \frac{AL^3}{140}$	
T_{1z}												
F_{2x}	$C_{ax} \frac{9AL}{70}$				$C_{ax} \frac{13AL^2}{420}$		$C_{ax} \frac{13AL}{35}$				$-C_{ax} \frac{11AL^2}{210}$	
F_{2y}		$C_{ay} \frac{9AL}{70}$		$-C_{ay} \frac{13AL^2}{420}$				$C_{ay} \frac{13AL}{35}$		$C_{ay} \frac{11AL^2}{210}$		
F_{2z}			V_a						V_a			
T_{2x}		$C_{ay} \frac{13AL^2}{420}$		$-C_{ay} \frac{AL^3}{140}$				$C_{ay} \frac{11AL^2}{210}$		$C_{ay} \frac{AL^3}{105}$		
T_{2y}	$-C_{ax} \frac{13AL^2}{420}$				$-C_{ax} \frac{AL^3}{140}$		$-C_{ax} \frac{11AL^2}{210}$				$C_{ax} \frac{AL^3}{105}$	

Fig.3-14 付加質量による質量マトリクス

E : ヤング係数
 I_x : y 軸周りの断面二次モーメント
 I_y : x 軸周りの断面二次モーメント
 L : 要素の長さ
 A : 断面積
 G : せん断弾性係数
 K : サンプナンのねじり係数
 ρ : 体積あたりの質量

3.1.2.2 ニューマーク β 法

骨組の時刻 t における運動方程式は 3-1 式で、時刻 t+Δt における運動方程式は 3-2 式である。

$$[M]\{\ddot{u}\}_t + [C]\{\dot{u}\}_t + [K]\{u\}_t = \{f\}_t \quad 3-1$$

$$[M]\{\ddot{u}\}_{t+\Delta t} + [C]\{\dot{u}\}_{t+\Delta t} + [K]\{u\}_{t+\Delta t} = \{f(t + \Delta t)\} \quad 3-2$$

[M]は質量マトリクス、[C]は減衰マトリクス、[K]は剛性マトリクスである。
この式に質量マトリクス M と剛性マトリクス K、F(t)を代入して、u(t)を求めたい。

ここで時刻 t+Δt における変位および速度をテーラー展開すると以下のようになる。

$$\{u\}_{t+\Delta t} \cong \{u\}_t + \Delta t\{\dot{u}\}_t + (\Delta t)^2\left(\frac{1}{2} - \beta\right)\{\ddot{u}\}_t + \beta\{\ddot{u}\}_{t+\Delta t} \quad 3-3$$

$$\{\dot{u}\}_{t+\Delta t} \cong \{\dot{u}\}_t + \frac{\Delta t}{2}(\{\ddot{u}\}_t + \{\ddot{u}\}_{t+\Delta t}) \quad 3-4$$

この時刻 t+Δt における変位および速度を運動方程式に代入して a{t+Δt}について整理すると、以下のようになる。

$$\begin{aligned} \{\ddot{u}\}_{t+\Delta t} = & ([M] + \frac{\Delta t}{2}[C] + \beta(\Delta t)^2[K])^{-1}[\{f\}_{t+\Delta t} - [C](\{\dot{u}\}_t \\ & + \frac{\Delta t}{2}\{\ddot{u}\}) - [K](\{u\}_t + \Delta t\{\dot{u}\}_t + (\frac{1}{2} - \beta)(\Delta t)^2\{\ddot{u}\}_t)] \end{aligned}$$

3-5

さらにこれをテーラー展開した変位(3-3式)と速度(3-5式)に代入して変位と速度が得られる。

骨組構造物の各節点の変位や応力を時間領域で計算するためにニューマーク β 法を使用したプログラムを作成した。このプログラムによって、質量マトリクス M、剛性マトリクス K、外力 F(t)から変位 u(t)を求めることができる。

3.1.2.3 レーレー減衰

時間積分は各時刻で運動方程式が平衡状態に達するように変位、速度、加速度の状態を求める。作成した海流発電システムの動的応答解析プログラムは前の時刻の状態量を用いて右辺の外力を求め、運動方程式を解いて、次の時刻の状態量を求めている。厳密には平衡状態に達していないので、計算結果が緩やかに発散する可能性がある。これを防止するために、レーレー減衰を用いて計算を安定させている。

3.1.2.4 三次元骨組構造物の動的応答解析プログラムの計算例

ここでは、前節までで作成した剛性マトリクス[K]、質量マトリクス[M]、ニューマークβ法のプログラムを組み合わせ作成した三次元骨組構造物の動的応答解析プログラムの計算例を示す。

Fig3-15 のような楕円柱要素をつなげて、片持ち梁に初期変位を与えて固有振動解析を行った。

Fig-3-16 のように断面 $2\text{m} \times 0.5\text{m}$ 、長さ 100m の楕円柱梁の左端（座標： $0, 0, 0$ ）を固定し、右端（座標： $0, 0, 100$ ）に初期変位 $(1.5, 1.0, 0)$ を与え、左端の変位の時間領域変動を計算した。入力データは Fig3-17 で計算結果が Fig3-18 である。

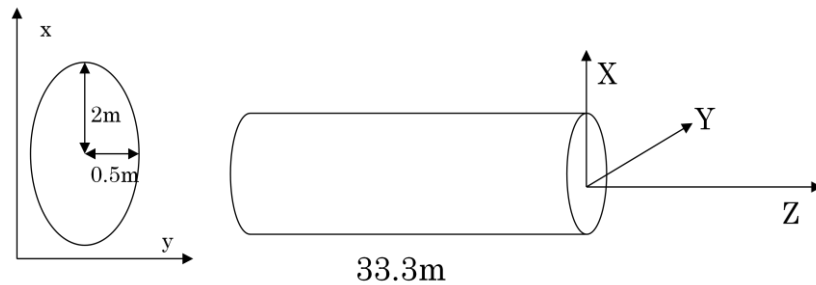


Fig.3-15 プログラムテストの要素

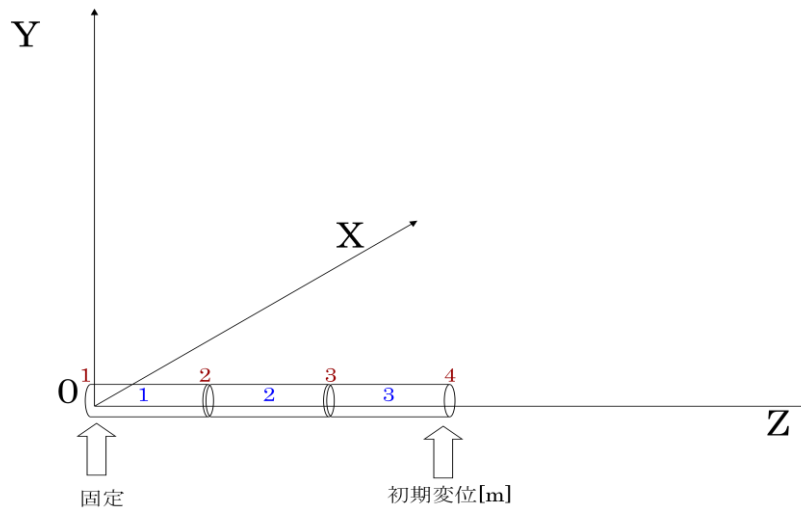


Fig.3-16 プログラムテストの要素配置図

節点数	要素数		
4	3		
要素両端の節点番号			
要素番号	節点番号1	節点番号2	
1	1	2	
2	2	3	
3	3	4	
節点の座標			
節点番号	X座標	Y座標	Z座標
1	0	0	0
2	0	0	33.3
3	0	0	66.6
4	0	0	100
材料情報			
ヤング率	断面積	密度	
2.0E+11	25.1	10000	
拘束条件			
拘束節点番号			
1			

Fig.3-17 プログラムテストの立体骨組解析の入力データ

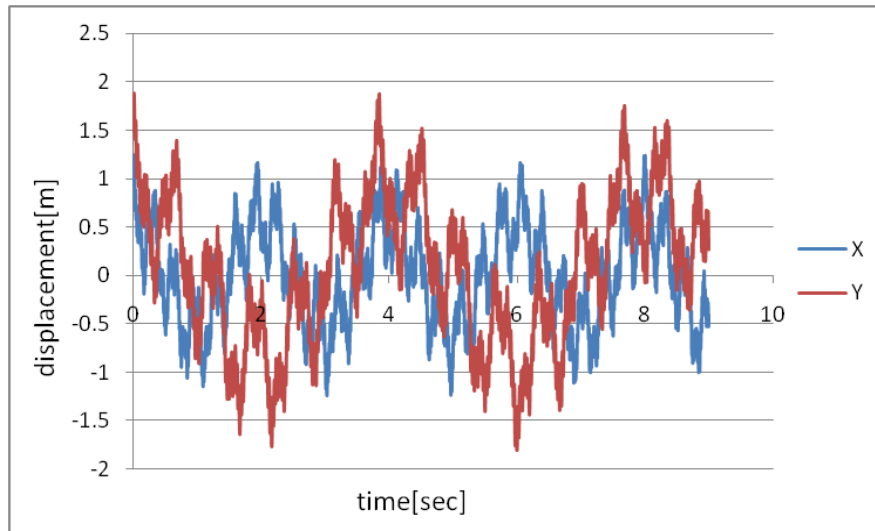


Fig.3-18 立体骨組の X 方向、Y 方向の計算結果

片持ち梁の固有振動数は Fig.3-19 の公式で表わされる。これにより片持ち梁の固有周期 T は

$$T = \frac{2\pi}{p} \quad 3-6$$

で求められる。

ここで

E : ヤング係数

L : 要素の長さ

ρ : 体積あたりの質量

g : 重力加速度

である。

この式を用いてプログラムの計算例で使用した片持ち梁の固有周期を求めると Table.3-1 のようになり X 軸方向の 1 次の固有周期が 1.9[s]、2 次の固有周期が 0.3[s]、Y 軸方向の 1 次の固有周期が 3.9[s]、2 次の固有周期が 0.6[s]であり、Fig3-18 と比べると 1 次、2 次の固有振動数ともによく表れており、正確に自由振動の計算が行えていることがわかる (Fig.3-20)。

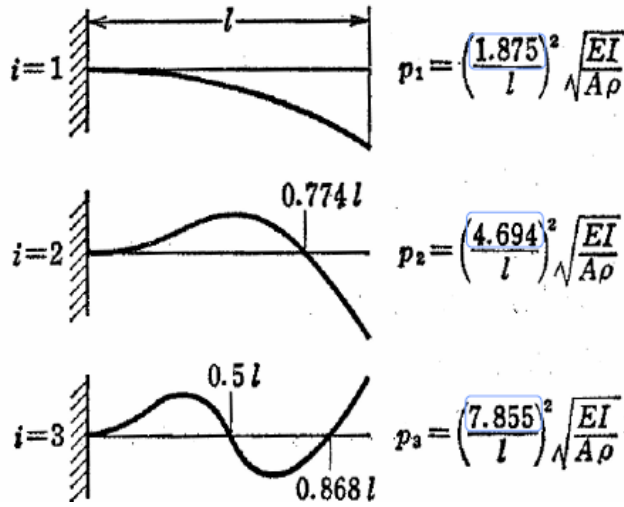


Fig.3-19 片持ち梁の固有振動数

Table.3-1 梁の公式による固有周期の計算

	X 方向	Y 方向
密度 ρ [kg/m ³]	1.0E+4	1.0E+4
ヤング率 [N/m ²]	2.0E+11	2.0E+11
断面二次モーメント [m ⁴]	100.5	25.12
断面積 [m ²]	25.13	25.13
一次の固有振動数 [rad/s]	3.14	1.57
二次の固有振動数 [rad/s]	19.7	9.85
一次の固有周期 [s]	1.9	3.9
二次の固有周期 [s]	0.3	0.6

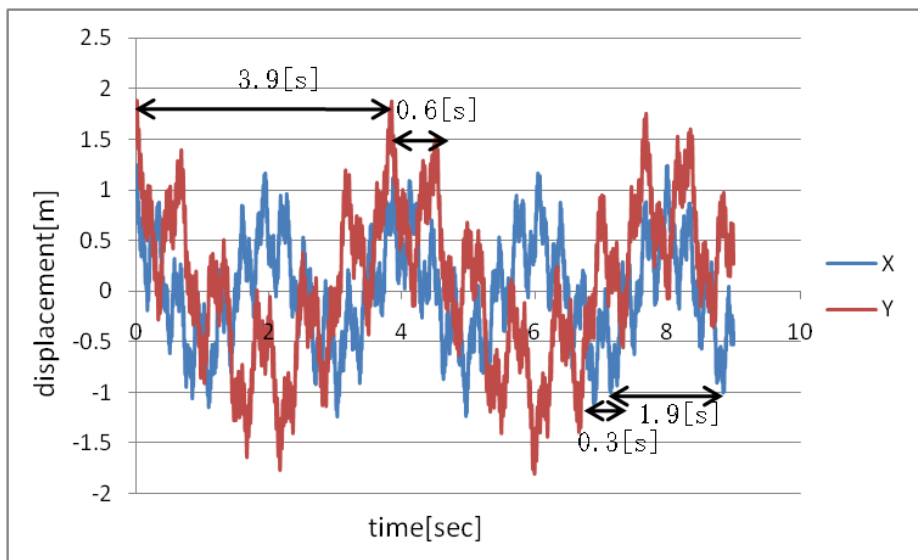


Fig3-20 計算結果から固有周期の読み取り

3.2 流体力評価プログラムの作成

先行研究の流体力評価[2]から求めた外力を計算するプログラムを作成した。骨組構造物の節点数、要素数、座標、接続情報、材料情報、波の波高、角周波数を入力すると、各節点にかかる荷重が得られるプログラムである(Fig.3-21)。

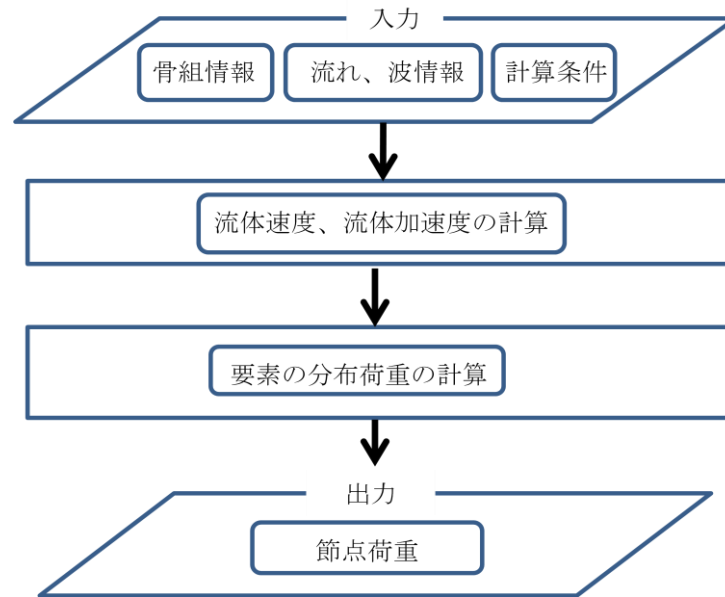


Fig.3-21 流体力プログラムのフロー

その方法は、波浪のポテンシャルから、節点座標における流体粒子速度・加速度を計算し、それを全体座標形から要素座標形に変換する。要素両端の流体粒子の速度・加速度から、先行研究で求めた流体力評価法を用いて要素両端の単位長さあたりの分布荷重を算出する。

先行研究での流体力評価の式はモリソン式

$$dF_x = C_m \rho \frac{\pi D^2}{4} dz \frac{\partial u}{\partial t} + C_d \frac{\rho}{2} D dz |u| u \quad 3-7$$

慣性力は、流体加速度を x 軸方向成分 A_x と y 軸方向成分 A_y に分解し、下式を用いて x 軸方向荷重 F_x と y 軸方向荷重 F_y の重ね合わせとして得られる。

$$F_x = (\rho \nabla + \rho \pi R_y^2) \frac{du_x}{dt} = \rho \pi R_y (R_x + R_y) A_x \quad 3-8$$

$$F_y = (\rho \nabla + \rho \pi R_x^2) \frac{du_y}{dt} = \rho \pi R_x (R_x + R_y) A_y \quad 3-9$$

一方、楕円柱の抗力係数と揚力係数はデータがないため楕円柱の要素の曳航実験を行い算

出した。

また、作成するプログラムの流体力の評価は、構造全体を構成する個々の部材に作用する流体力を単純に足し合わせて、全体に作用する流体力を求めるというものであるため、細かい部材で構成され、個々の部材間に相互干渉が無い場合には精度良く求めることができるが、部材間に相互干渉が生じて、個々の部材に作用する流体力を足し合わせて全体の流体力を評価する方法が適用できない可能性がある。具体的には、海流発電装置のロータと支持構造間に相互干渉が考えられる。ロータ後流では、流速が落ちるので、全体抵抗が大きく減少する可能性がある。この点を実験から明確にする必要がある。

以下に

- ・楕円柱の流体力評価法
- ・流体の速度、加速度の計算方法
- ・分布荷重
- ・楕円柱の曳航実験
- ・ロータと浮体の相互干渉効果計測実験

について記述する。

3.2.1 楕円柱の流体力評価法

まず、流体中の細長い構造にかかる荷重の評価法について説明する。

円柱構造要素の直径 D が波長 L と比べて十分に小さいとき (i.e. $D/L < 0.2$)、構造物が波に与える影響は小さく構造物が波に与える影響を考慮する必要がない。

このような状態における構造物への荷重効果は、スカラー量として重ね合わせた圧力場により生じる。作用する以下のような荷重について順に説明する。

- ・ Froude-Krylov force
- ・ 質量力
- ・ 抗力
- ・ 揚力
- ・ 浮力、重力

3.2.1.1 Froude-Krylov force

Fig.3-22 のように、波中の微小体積要素 $dV = dxdydz$ に対する x 軸方向の荷重は、前後の表面積 $dS = dydz$ にかかる圧力の差によって発生する。この圧力をテイラー展開すると、

$$dF_x = (p_{x_1} - p_{x_2}) dydz = \left(-\frac{\partial p}{\partial x} \right) dxdydz = -\frac{\partial p}{\partial x} dV \quad 3-10$$

Froude-Krylov force は、下式のように圧力を構造表面 S で積分して求められる。ガウス定理により、体積積分となる。

$$\mathbf{F} = -\int_{(S)} p \mathbf{n} dS = -\int_{(V)} \nabla p dV \quad 3-11$$

オイラー式を体積分に代入し非定常項のみを考慮すると、圧力による荷重が得られる。

$$\mathbf{F} = \int_{(V)} \rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} dV = \int_{(V)} \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} dV + \int_{(V)} \rho (\mathbf{v}^T \cdot \nabla) \mathbf{v} dV \quad 3-12$$

線形波理論では加速の対流項は無視し、また構造物が細い場合は構造物の加速は水粒子の加速に置き換えられる。

これらの仮定から Froude-Krylov force は、

$$\mathbf{F} = \rho V \cdot \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} \quad 3-13$$

となり、排水重量と水粒子加速度から求められる。つまり、中立浮力の小さな固体要素が受ける荷重は質量 ρV と水粒子加速度 $\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t}$ で決まる。

式 3-2 中の動圧は、非定常 Bernoulli 式で置き換えられるから、Froude-Krylov force は速度ポテンシャル Φ_0 を用いて下式で表せる。

$$\mathbf{F} = -\int_{(S)} p \mathbf{n} dS = \rho \int_{(S)} \frac{\partial \Phi_0}{\partial t} \mathbf{n} dS \quad 3-14$$

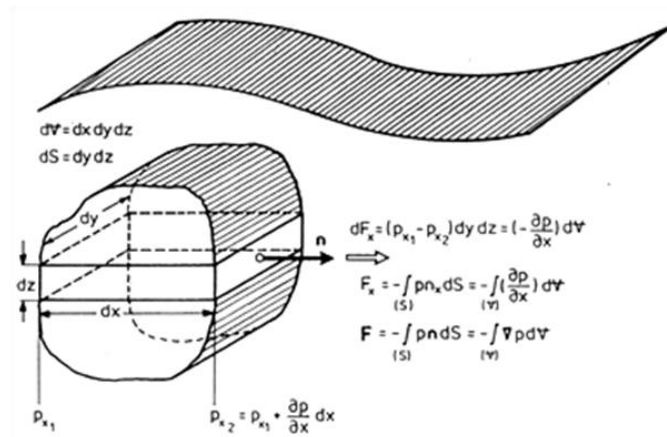


Fig.3-22 Froude-Krylov force[3]

3.2.1.2 質量力

構造要素と流体粒子間に相対加速度があるとき、それによって発生する圧力を積分して求められる荷重が質量力である。

例えば半径 R で十分に長い円柱の周りを、円柱の軸と垂直な方向に非粘性流体が流れるときの速度ポテンシャルは、

$$\Phi = u_{\infty} \left(r + \frac{R^2}{r} \right) \cos \theta \quad 3-15$$

となる。流体粒子が加速している場合、円柱は速度起源の圧力と加速度起源の圧力を受けるが、速度起源の圧力は対称であるため構造に荷重を与えない(the d'Alembert paradox) ため、流れの加速度による圧力のみを考慮すればよい。流れの加速度 $\dot{u}_{\infty} = du_{\infty} / dt$ による圧力は Bernoulli 式から、

$$p = -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} = -\rho \left[\left(r + \frac{R^2}{r} \right) \cos \theta \right] \cdot \dot{u}_{\infty} \quad 3-16$$

となる。円柱表面の圧力は、

$$p = [-2\rho R \cos \theta] \cdot \dot{u}_{\infty} \quad 3-17$$

円柱の長さが1のとき、圧力荷重は、 $n_x = \cos \theta$ と $dS = R \cdot l \cdot d\theta$ から、

$$\begin{aligned} F_x &= -\int_{(S)} p n_x dS = -\int_0^{2\pi} p \cos \theta l \cdot R d\theta = \rho \cdot 2\pi R^2 \cdot l \cdot \dot{u}_{\infty} \\ &= 2\rho \nabla \cdot \dot{u}_{\infty} \end{aligned} \quad 3-18$$

となる。この半分は外部流れによる荷重(Froude-Krylov force)、残り半分は円柱を回る流れによる荷重(付加質量力)である。円柱の場合この2力は等しい。

流れのない流体中を円柱が \dot{u}_c でその軸と垂直な方向に加速する場合、速度ポテンシャルは、

$$\Phi = -u_c \cdot \frac{R^2}{r} \cos \theta \quad 3-19$$

となり、円柱表面の圧力分布は、

$$p_{r=R} = -\rho \left(\frac{\partial \Phi}{\partial t} \right)_{r=R} = (\rho R \cos \theta) \cdot \dot{u}_c \quad 3-20$$

この圧力分布から、流体力学的質量力は Fig.3-23 により

$$F_x = -\int_0^{2\pi} p_{r=R} \cos \theta \cdot R l d\theta = -\theta \pi R^2 l \dot{u}_c = -m_{11} \cdot \dot{u}_c \quad 3-21$$

となり、 m_{11} を流体力学的質量(hydrodynamic mass)あるいは付加質量(added mass)という。

構造の質量を m_0 とすると、ニュートン式とから、

$$F_x = -(m_0 + m_{11}) \cdot \dot{u}_c \quad 3-22$$

となり、構造の質量が増えたような状態になることが分かる。細長い構造の断面が形状関数 $\Gamma(r)$ で表される場合、速度ポテンシャルは、

$$\Phi = -u_c \cdot [r\Gamma(r) \cos \theta] \quad 3-23$$

となる。Fig.3-24 から構造にかかる X 軸方向の圧力荷重は

$$F_x = -\int_{(S)} p n_x dS = -\int_{(S)} p_{r=R_c} \cos \beta dy dz \quad 3-24$$

ここでも、浸水表面 S への圧力は Bernoulli 式から、

$$p_{r=R_c} = -\rho \left(\frac{\partial \Phi}{\partial t} \right)_{r=R_c} = [\rho R_c \Gamma(R_c) \cos \theta] \dot{u}_c \quad 3-25$$

$x_c = R_c \cos \theta$ 、 $dz = \cos \beta \cdot ds$ より、加速度による圧力荷重は、

$$F_x = -\dot{u}_c \int_{(V)} \rho \Gamma(R_c) x_c dy dz = -\dot{u}_c \int_{(V)} \Gamma(R_c) \rho dV = -m_{11} \dot{u}_c \quad 3-26$$

($dV = x_c dy dz$)

ここで、

$$m_{11} = \rho \int_{(V)} \Gamma(R_c) \frac{dV}{V} = C_a \rho V \quad 3-27$$

は構造の付加質量であり、係数 C_a を付加質量係数(added mass coefficient)という。柱状構造の付加質量はその断面形状によって異なる。その例を Fig.3-25 に示す。

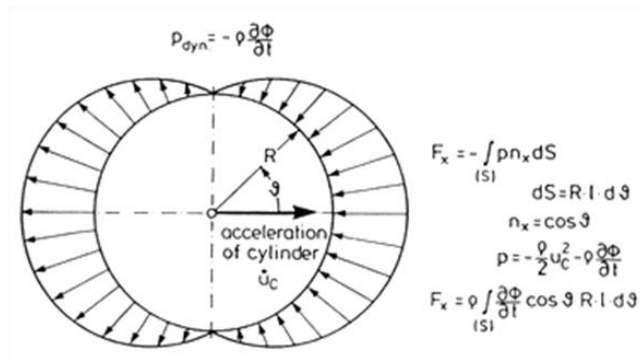


Fig.3-23 静止流体中で加速する円柱まわりの圧力分布[3]

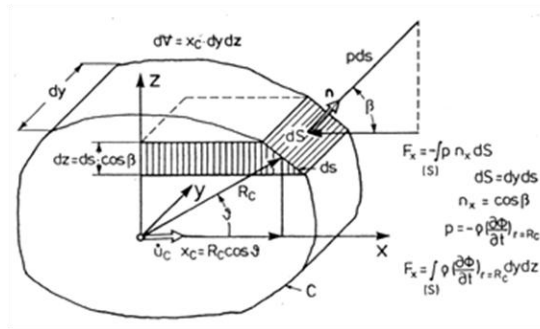


Fig.3-24 静止流体中で加速する柱状構造に発生する圧力荷重[3]

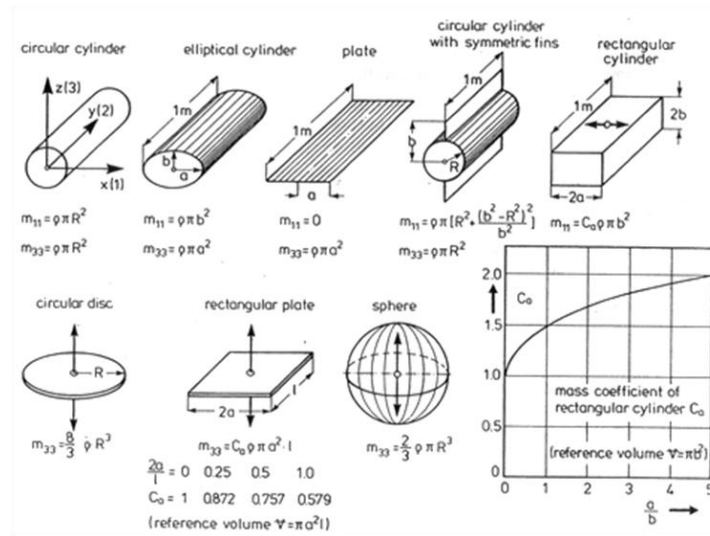


Fig.3-25 柱状構造要素や三次元立体要素の付加質量[3]

3.2.1.3 波中での質量力

加速流中に円柱構造物を固定したとき、円柱構造物にかかる荷重は速度ポテンシャルから導くことができる。

$$\Phi = ur \left[1 + \left(\frac{R}{r} \right)^2 \right] \cos \theta \quad 3-28$$

これは一様流の速度ポテンシャルとダブレット流の合計となっているが、ダブレット流の速度ポテンシャルは形状関数で表せるので、

$$\Phi = ur [1 + \Gamma(r)] \cos \theta \quad 3-29$$

となる。構造物表面の圧力は、

$$p_{r=R_c} = -\rho \left(\frac{\partial \Phi}{\partial t} \right)_{r=R_c} = -\rho R_c [1 + \Gamma(R_c)] \cos \theta \cdot \frac{\partial u}{\partial t} \quad 3-30$$

加速流中で固定された柱状構造が受ける荷重は、

$$F_x = \rho \frac{\partial u}{\partial t} \int_{(\forall)} [1 + \Gamma(R_c)] d\forall = [\rho\forall + m_{11}] \frac{\partial u}{\partial t} = (1 + C_a) \rho\forall \cdot \frac{\partial u}{\partial t} \quad 3-31$$

ここで流体粒子の加速 $\frac{\partial u}{\partial t}$ が水平な場合、

$$m_{11} = \rho\forall \int_{(\forall)} \Gamma(R_c) \frac{d\forall}{\forall} = C_a \rho\forall \quad 3-32$$

が付加質量となっている。

柱状構造が固定されていない場合、速度ポテンシャルは、

$$\Phi = ur[1 + \Gamma(r)] \cos \theta - u_c r \Gamma(r) \cos \theta \quad 3-33$$

となり、加速度依存の圧力による荷重は、

$$F_x = \rho\forall \frac{\partial u}{\partial t} + C_a \rho\forall \left(\frac{\partial u}{\partial t} - \dot{u}_c \right)$$

となる。加速する構造物自体の質量による慣性力を考慮すると、下式になる。

$$F_x = (1 + C_a) \rho\forall \frac{\partial u}{\partial t} - (m_0 + C_a \rho\forall) \dot{u}_c \quad 3-34$$

以上をまとめると、以下のようなになる。

- ・ 加速流柱に固定された柱状構造

$$F_x = (1 + C_a) \rho\forall \left[\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} \right] = (\rho\forall + m_{11}) \frac{du}{dt} \quad 3-35$$

- ・ 静止流体中で加速する柱状構造

$$F_x = -(m_0 + C_a \rho\forall) \dot{u}_c = -(m_0 + m_{11}) \dot{u}_c \quad 3-36$$

3.2.1.4 抗力

Fig.3-27 のように波浪中に設置された垂直な円柱の長さ dz 部分に発生する水平方向荷重 dF_x は合慣性力と抗力の合計であり、下式で表せる。

$$dF_x = f_0 dz = (f_m + f_d) dz = C_m \rho \frac{\pi D^2}{4} dz \frac{\partial u}{\partial t} + C_d \frac{\rho}{2} D dz |u| u \quad 3-37$$

ここで、 $C_m = 1 + C_a$ は質量係数で C_d は抗力係数である。

Fig.3-26 は柱状構造の断面形状ごとに、レイノルズ数による抗力係数の変化を表わしたグラフである。

波浪中に垂直に固定した円柱に発生する荷重は 3-37 式で表せるが、波浪中で構造物自体も運動する場合、Froude-Krylov に変化はないが質量力、漂流力は相対加速度、相対速度に依存し、下式のようなになる。

$$dF_x = \rho d \nabla \frac{\partial u}{\partial t} + C_a \rho d \nabla \left(\frac{\partial u}{\partial t} - \dot{u}_c \right) + C_d \frac{\rho}{2} d A |u - u_c| (u - u_c) \quad 3-38$$

水深 z における抗力と質量力の最大値の比率は、Keulegan-Carpenter 数を用いて次式で表せる。

$$\frac{f_{da}}{f_{ma}} = \frac{C_d}{\pi C_m} \frac{H}{D} e^{kz} = \frac{1}{\pi^2} \frac{C_d}{C_m} KC \cdot e^{kz} \quad 3-39$$

Keulegan-Carpenter 数は全体荷重に対する抗力の割合の基準となる値であり、水平方向水粒子最大速度 u_a 、波周期 T 、円柱直径 D を使用して、

$$KC = \frac{u_a T}{D} = \frac{2\pi\zeta_a}{D \tanh kd} \quad 3-40$$

とかける。大深水では、

$$KC = \frac{2\pi\zeta_a}{D} = \frac{\pi H}{D} \quad 3-41$$

となる。(H : 波高)

実際の浮体構造物を設計する際には、KC の値を用いて支配的な荷重の種類を判断し、大まかな動揺の計算を行うことができる。

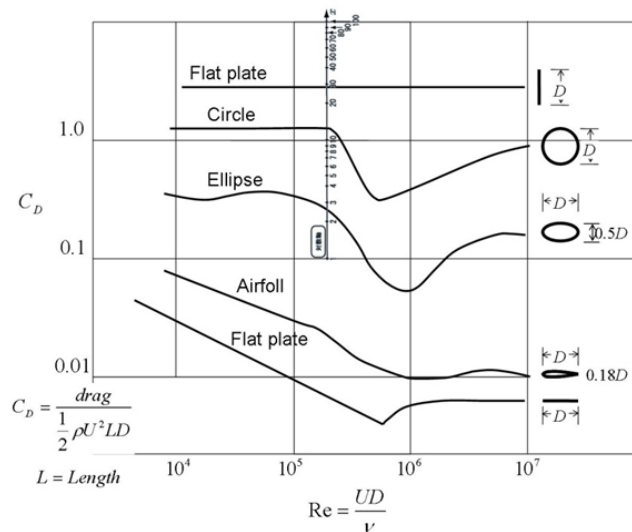


Fig.3-26 抗力係数とレイノルズ数の関係(Electrathon Vehicle Construction Site データより作成)

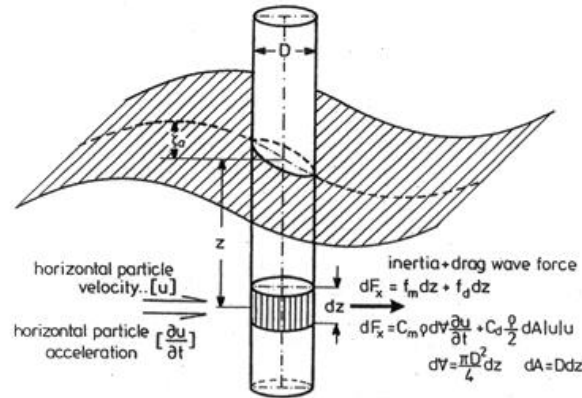


Fig.3-27 垂直な円柱に発生する波力[3]

3.2.1.5 揚力

波浪中の楕円柱に発生する力としてモリソン式で計算できないものが、揚力である。

楕円柱の揚力のデータが見つからないため、本研究において楕円柱の曳航実験を行って楕円柱の揚力係数のデータを作成する。

3.2.1.6 重力と浮力

本研究の流体力プログラムでは重力と浮力を考慮する。浮力と重力は静的な荷重で分布荷重と取り扱う。

3.2.2 流体速度、流体加速度の計算方法

流体速度と流体加速度を求める。その方法は波浪のポテンシャルから、節点座標における流体粒子速度・加速度を計算し、それを全体座標形から要素座標形に変換する。要素両端の流体粒子の速度・加速度から、流体力評価法を用いて要素両端の単位長さあたりの分布荷重を算出する。

水深が十分に深い($H/L > 0.5$)場合の波浪のポテンシャルの方程式は、

$$\phi = -\frac{Hg}{2\omega} e^{kz} \sin(k_x x + k_y y - \omega t) + V_x x + V_y y \quad 3-42$$

とかける。ここで、

H : 波高 (m)

ω : 角周波数

k_x : X 軸方向波数

k_y : Y 軸方向波数

h : 水深 (m)

g : 重力加速度(m/s^2) 9.80665 m/s^2

V_x : X 軸方向流速

V_y : Y 軸方向流速

式 3-42 から、各方向の流速と加速度を求めると、

$$\dot{u} = \frac{\partial \Phi}{\partial x} = -k_x \frac{Hg}{2\omega} e^{kz} \cos(k_x x + k_y y - \omega t) + V_x$$

$$\ddot{u} = \frac{\partial \dot{u}}{\partial t} = -\omega k_x \frac{Hg}{2\omega} e^{kz} \sin(k_x x + k_y y - \omega t)$$

$$\dot{v} = \frac{\partial \Phi}{\partial y} = -k_y \frac{Hg}{2\omega} e^{kz} \cos(k_x x + k_y y - \omega t) + V_y$$

$$\ddot{v} = \frac{\partial \dot{v}}{\partial t} = -\omega k_y \frac{Hg}{2\omega} e^{kz} \sin(k_x x + k_y y - \omega t)$$

$$\dot{w} = \frac{\partial \Phi}{\partial z} = -k \frac{Hg}{2\omega} e^{kz} \sin(k_x x + k_y y - \omega t)$$

$$\ddot{w} = \frac{\partial \dot{w}}{\partial t} = \omega k \frac{Hg}{2\omega} e^{kz} \cos(k_x x + k_y y - \omega t)$$

$$\left(k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2} \right)$$

3-43

式 3-43 によって求めた各節点での各方向への速度と加速度は、全体座標系での値である。これを座標変換して要素座標系での速度と加速度を求める。これで、要素両端での要素座標系での流体加速度・流体速度が求められたので、流体力評価法によって、要素両端の要素座標系の荷重を求めることができる。

さらに求めた分布荷重を等価節点力に変換し、要素座標形の等価節点力を全体座標形の等価節点力に変換する必要がある。次節で分布荷重から等価節点力を求める方法を解説する。

3.2.3 分布荷重

梁要素の曲げ剛性マトリクスは、梁のたわみ形が要素内で 3 次式で表わされるものと仮定して導かれたものである。従って、梁要素内に分布荷重が存在せず、材端の力だけを受ける場合は、この剛性マトリクスを用いて、正しい撓みの解を得ることができる。しかし、Fig.3-27 のように等分布の荷重を受ける場合は、撓み形は 4 次式となるが、この場合も 3 次式の仮定より導いた曲げ剛性マトリクスが用いられる。このとき、梁要素内の分布荷重による仕事と、節点荷重による仕事が等しくなるような節点荷重値を求めておき、この節点荷重が解析に用いられる。

Fig.3-28 の場合、要素内の分布荷重による仕事の表現式を変換して、

$$\int_0^l q_x u(z) dz = [u_i, u_i', u_j, u_j'] \int_0^l q_x \left\{ \begin{array}{l} 1 - 3\left(\frac{z}{l}\right)^2 + 2\left(\frac{z}{l}\right)^3 \\ l \left\{ \left(\frac{z}{l}\right) - 2\left(\frac{z}{l}\right)^2 + \left(\frac{z}{l}\right)^3 \right\} \\ 3\left(\frac{z}{l}\right)^2 - 2\left(\frac{z}{l}\right)^3 \\ l \left\{ -\left(\frac{z}{l}\right)^2 + \left(\frac{z}{l}\right)^3 \right\} \end{array} \right\} dz$$

$$= [u_i, u_i', u_j, u_j'] \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{2} q_x l \\ \frac{1}{12} q_x l^2 \\ \frac{1}{2} q_x l \\ -\frac{1}{12} q_x l^2 \end{array} \right\}$$

3-44

となる。これより、梁要素両端の節点荷重は、

$$V_{xi} = \frac{1}{2} q_x l,$$

$$M_{yi} = \frac{1}{12} q_x l^2,$$

$$V_{xj} = \frac{1}{2} q_x l,$$

$$M_{yj} = -\frac{1}{12} q_x l^2$$

3-45

と表わされる。

同様に、Fig.3-29 に示すような三角形分布荷重と等価な節点荷重は、

$$\int_0^l q_x \frac{z}{l} u(z) dz = \left[u_i, u_i', u_j, u_j' \right] \left\{ \begin{array}{l} \frac{3}{20} q_x l \\ \frac{1}{30} q_x l^2 \\ \frac{7}{20} q_x l \\ -\frac{1}{20} q_x l^2 \end{array} \right\} \quad 3-46$$

となる。よって、

$$\begin{aligned} V_{xi} &= \frac{3}{20} q_x l, \\ M_{yi} &= \frac{1}{30} q_x l^2, \\ V_{xj} &= \frac{7}{20} q_x l, \\ M_{yj} &= -\frac{1}{20} q_x l^2 \end{aligned} \quad 3-47$$

となる。なお、梁要素内の 1 点に集中横荷重が作用する場合も、同様の計算法で、等価な節点荷重を求めることができる。しかし通常は、集中化重点を節点を選んで解析すればよいので、はり要素内に集中荷重が作用する場合の等価節点荷重を求める必要はない。

開発中のプログラムにおいては、波浪中の骨組構造には分布荷重が発生するが、要素に発生する分布荷重を細かく計算すると計算量が多くなるため、要素両端の分布荷重からその間の分布荷重は台形分布荷重として近似する。式 3-45, 3-47 から、台形分布荷重の等価節点荷重は、

$$\begin{aligned} V_{xi} &= \frac{7}{20} q_{ix} l + \frac{3}{20} q_{jx} l, \\ M_{yi} &= \frac{1}{20} q_{ix} l^2 + \frac{1}{30} q_{jx} l^2, \\ V_{xj} &= \frac{7}{20} q_{jx} l + \frac{3}{20} q_{ix} l, \\ M_{yj} &= -\frac{1}{20} q_{jx} l^2 - \frac{1}{30} q_{ix} l^2 \end{aligned} \quad 3-48$$

となり、応答解析プログラム内ではこの式によって等価節点力を求めることとする。

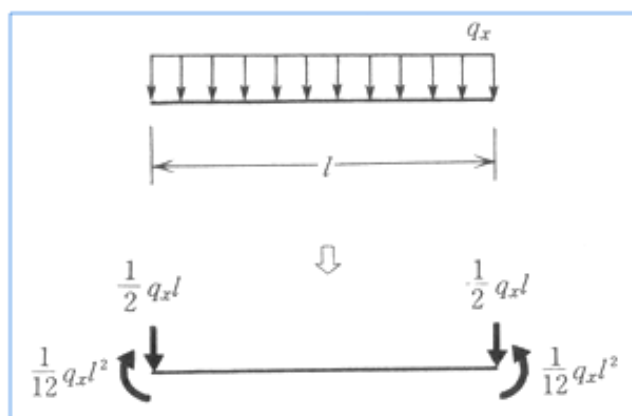


Fig.3-28 等分布荷重と等価な節点荷重

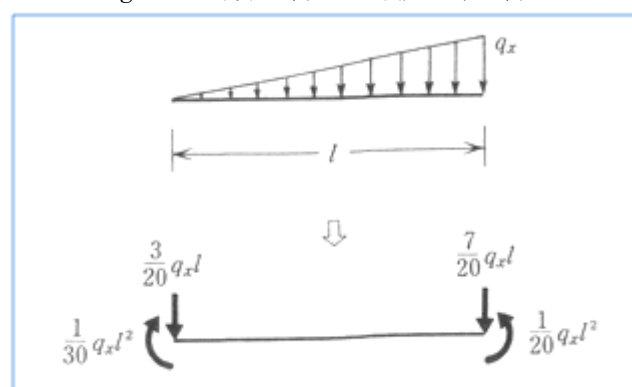


Fig.3-29 三角分布荷重と等価な節点荷重

3.2.4 楕円柱曳航実験

定常流中の楕円柱に発生する揚力と抗力の計算法を作成するために、楕円柱の曳航実験を行った。実験施設は東京大学本郷キャンパスの船型試験水槽を使用した(Fig.3-30)。実験装置は断面 $0.1\text{m} \times 0.04\text{m}$ 、高さ 0.6m の楕円柱 1 と断面 $0.08\text{m} \times 0.03\text{m}$ 、高さ 0.6m の楕円柱 2 である(Fig.3-31)。この楕円柱 1 と楕円柱 2 をそれぞれ 0.2m/s 、 0.4m/s 、 0.6m/s の一定速度で角度を変えながら曳航して楕円柱にかかる揚力と抗力を測定した。

・実験施設

東京大学本郷キャンパスの船型試験水槽を使用した。

船型試験水槽は東京大学大学院工学系研究科の施設であり、サイズ、機能等の情報は以下のようにになっている。

水槽：長さ 85m × 幅 3.5m × 水深 2.4m

造波機：周期 $0.7\text{sec} \sim 2.0\text{sec}$ 、波高 $15 \sim 120\text{mm}$ 、外部信号での制御可能

曳航電車： 速度 0.1m/sec～3.99m/sec、外部信号での制御可能

主な実験：

- ・ 波浪実験
- ・ 抵抗実験
- ・ 対抗性能計測
- ・ 浅水域における流体計測
- ・ 強制動揺装置による流体力計測
- ・ 曳航電車による大幅強制動揺

連絡先： 秋元 博路(東京大学工学系研究科準教授)



Fig.3-30 船型試験水槽

・ 実験装置

・ 実験装置は楕円柱 1 と楕円柱 2 の両端に端板を取り付け、その上に検力計を水面より上に出すための接続パイプと、検力計を接続したものである(Fig.3-31)。Fig.3-32 は実際に用いた楕円柱の写真である。これを曳航台車と接続して、装置の角度と曳航速度を変えながら計測を行った。

・ 検力計 (Fig.3-33)

3 分力検出器(LMC-3506-200N)を使用。Fx、Fy、My が測定できるモデル。本実験では My は不要。200N まで測定が可能である。

・ 電圧増幅器 (Fig.3-34)

直流型歪み増幅機(DSA-100A)を使用し電圧データをオシロスコープへ送る。

・ オシロスコープ (Fig.3-34)

電圧データを MO ディスクに記録する。

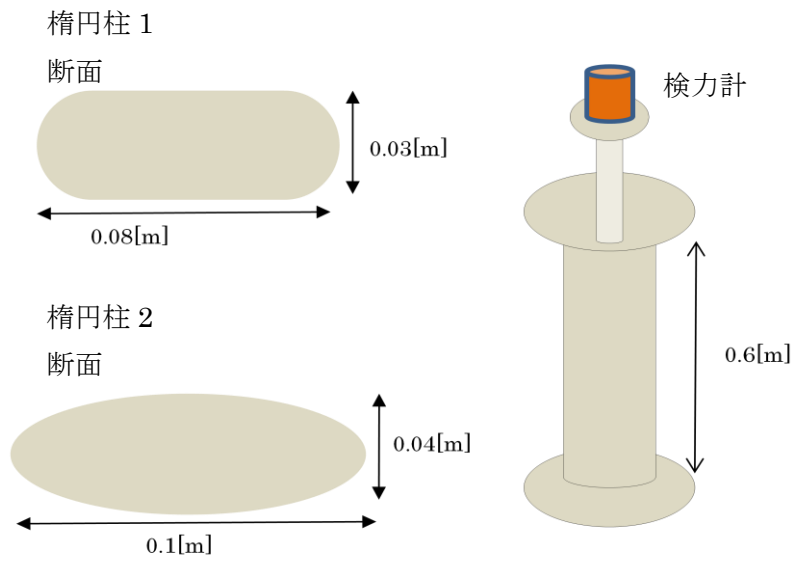


Fig.3-31 実験装置



Fig.3-32 実験で用いた楕円柱

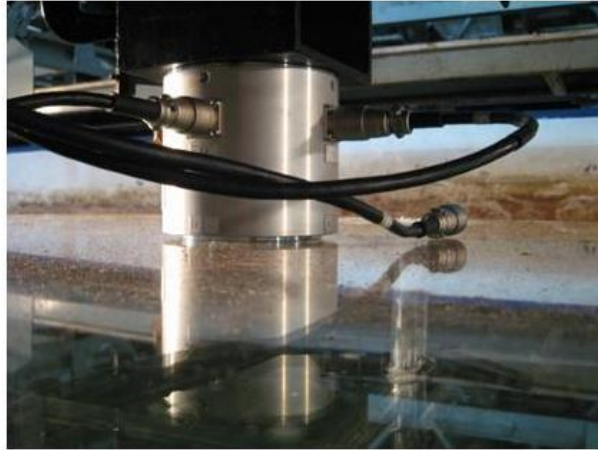


Fig.3-33 検力計



Fig.3-34 電圧増幅器とオシロスコープ

- ・ 実験目的

この実験の目的は、楕円柱の角度を変えながら曳航して角度と抗力・揚力の関係を求めることである。

- ・ 実験方法

以下の条件で測定を行った。

実験装置を使用した、楕円柱部分の荷重測定

実験装置を、角度と速度を変えながら曳航し、抗力と揚力を測定した。

- ・ 実験条件

以下の条件で曳航実験を行った。

曳航速度：0.2m/s、0.4m/s、0.6m/s

楕円柱角度：0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90deg

出力されたデータを専用のソフト(TEAK 社の Extr TAFF)で時間領域の電圧の変化として出力すると、Fig.3-35 のような電圧のデータが出力される。これは楕円柱 1 を角度 0deg、

速度 0.6m/s で曳航したときのデータであるが、ノイズや装置の振動の影響が大きく出ている。まずノイズを取るために前後 100 データで平均値をとってノイズを除去したものが、Fig.3-36 である。次に、速度が一定になって安定した部分で平均値をとり、電圧から荷重を計算する。

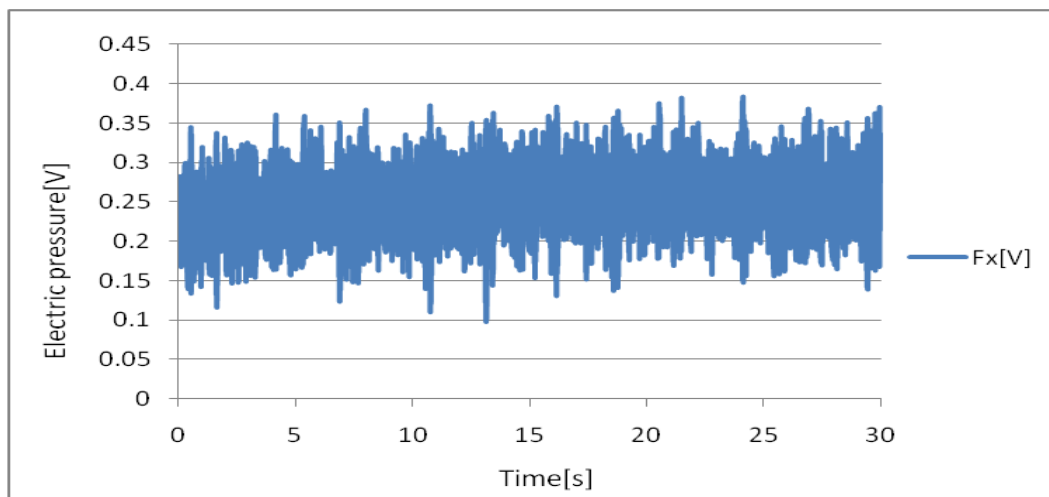


Fig.3-35 楕円柱 1 を速度 0.6m/s で曳航した時の電圧変化

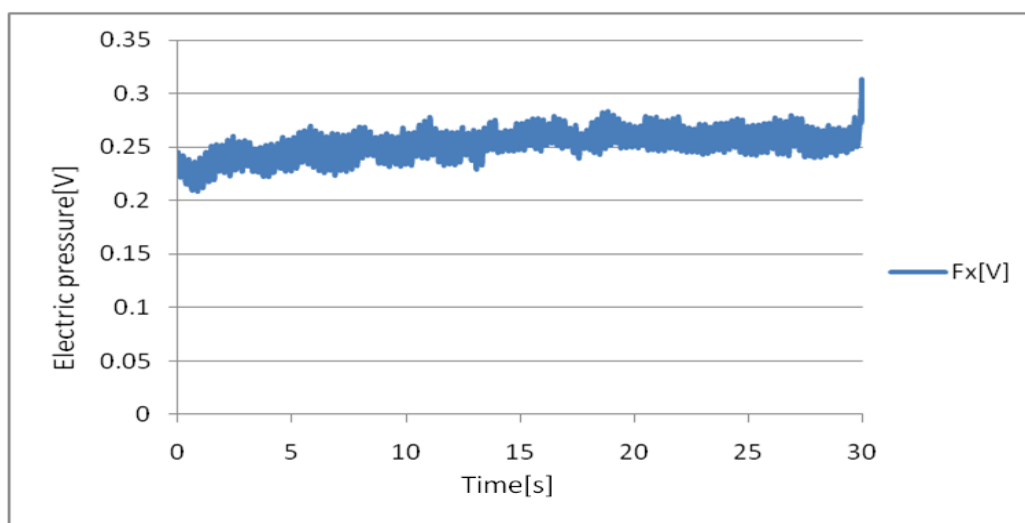


Fig.3-36 ノイズ除去後の楕円柱 1 を速度 0.6m/s で曳航した時の電圧変化

以上の作業で求めた荷重値 F_x 、 F_y から Fig.3-37 に従って揚力 F_L 、抗力 F_D を求めた。検力計は楕円柱に固定しているため、計測できる荷重は Fig.3-37 における F_x と F_y である。これを抗力 F_D と揚力 F_L に変換する必要がある。変換の式は、

$$F_D = F_x \cos \theta + F_y \sin \theta$$

$$F_L = -F_x \sin \theta + F_y \cos \theta$$

3-49

となる。

これを、式

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho V^2 LD} \quad 3-50$$

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho V^2 LD} \quad 3-51$$

によって無次元化し、抗力係数と揚力係数を求めた。

ここで、

ρ : 流体密度 [kg/m³]

V : 流体速度 (曳航速度) [m/s]

LD : 楕円柱が垂直時の投影面積 [m²]

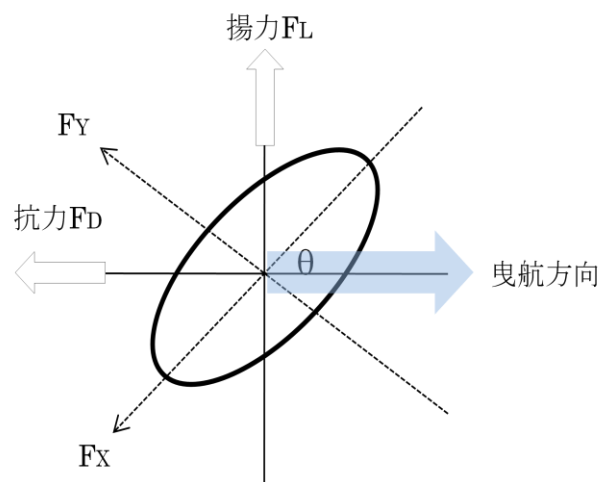


Fig.3-37 荷重変換の図

・実験結果

楕円柱 1 と楕円柱 2 の曳航速度 0.2m/s、0.4m/s、0.6m/s のそれぞれについて、楕円柱角度 θ による揚力係数と抗力係数の値を Fig.3-38、Fig.3-39、Fig.3-40、Fig3-41 に示す。

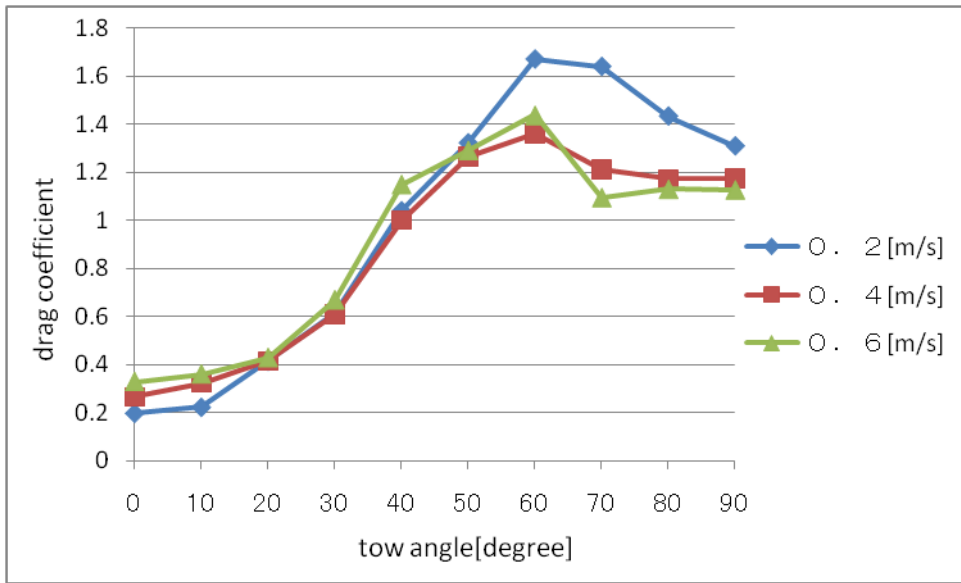


Fig.3-38 楕円柱 1 の抗力係数の測定値

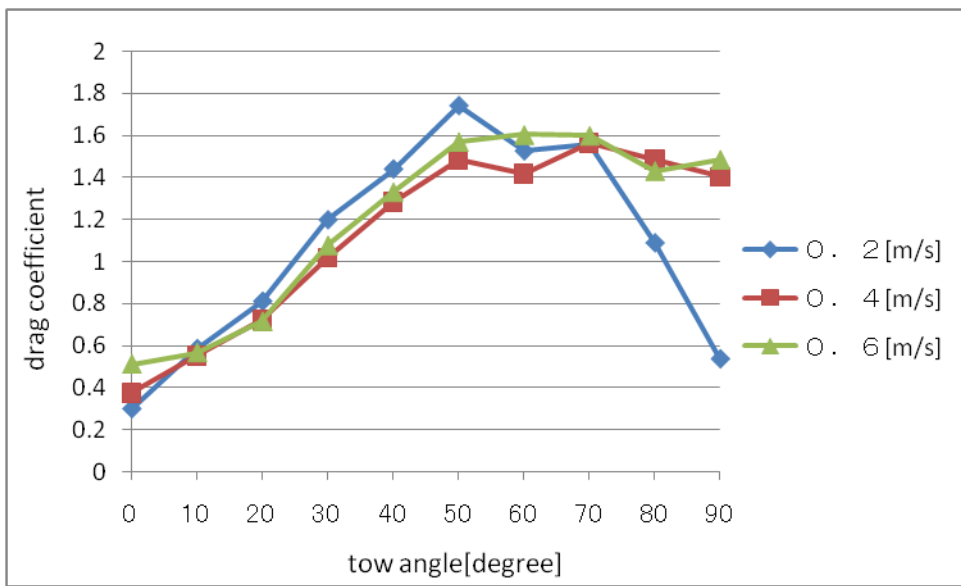


Fig.3-39 楕円柱 2 の抗力係数の測定値

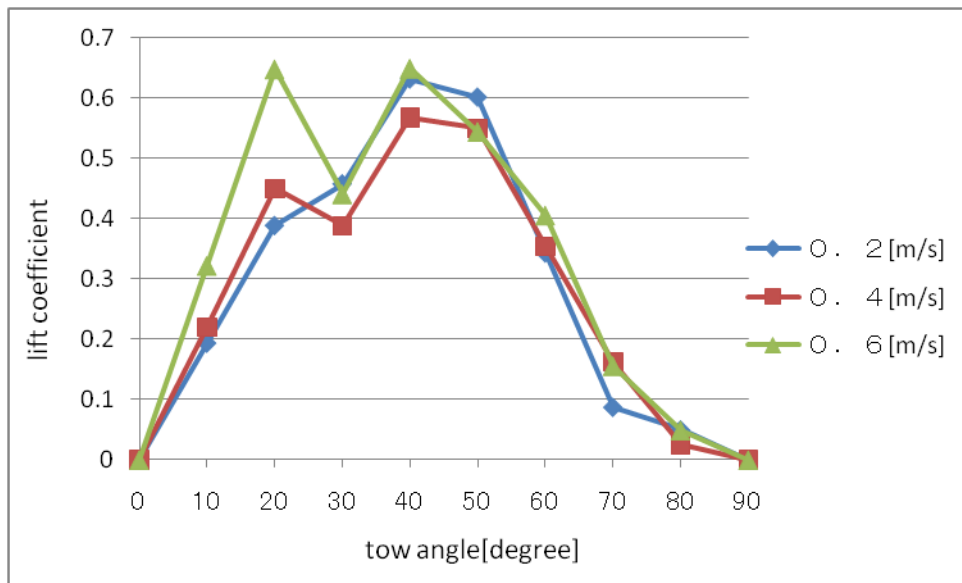


Fig.3-40 楕円柱 1 の揚力係数の測定値

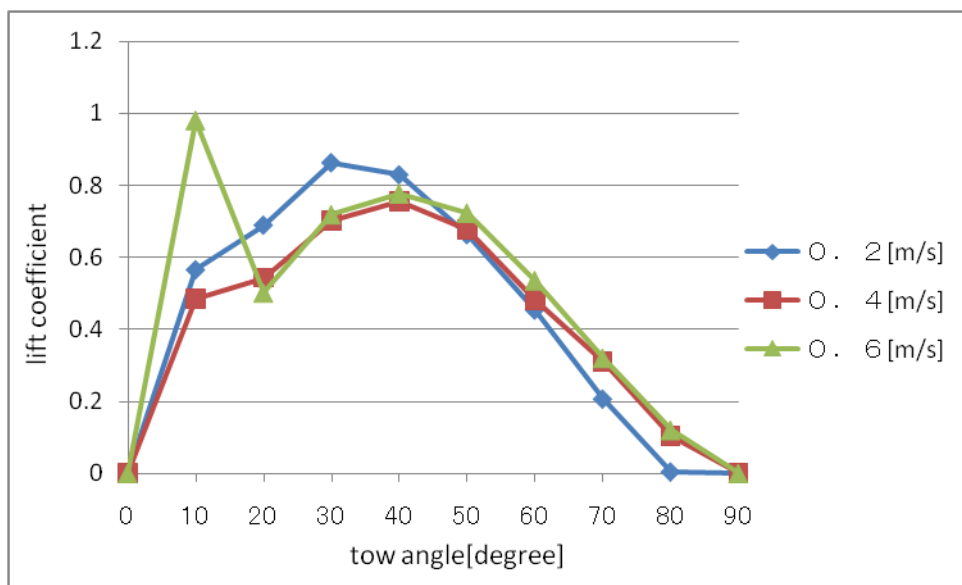


Fig.3-41 楕円柱 2 の揚力係数の測定値

ここからは、実験模型と同じ形状である楕円柱 2 の流体の粘性の影響がより実機(レイノルズ数 3000,000 程度)の状況に近いと思われる曳航速度 0.6m/s(レイノルズ数 300,000 程度)の場合について解析する。

Fig.3-42 は、曳航速度 0.6m/s での抗力係数 C_D と揚力係数 C_L の楕円柱の角度との対応のグラフである。

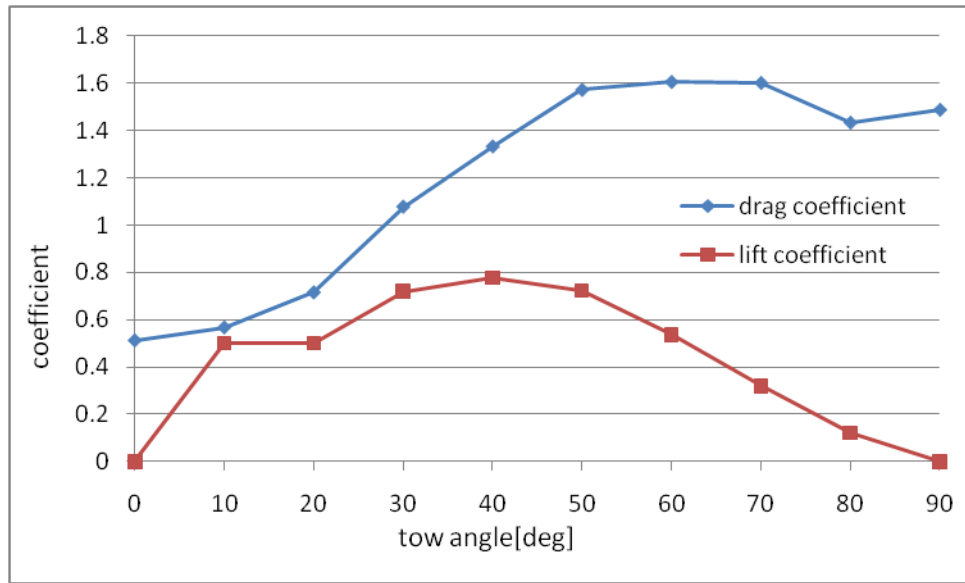


Fig.3-42 楕円柱の抗力係数、揚力係数 (0.08m×0.03m 楕円、長さ 0.6m、流速 0.6m/s)

・結果の考察

Fig.3-43 は、曳航速度 0.6m/s での抗力係数 C_D と揚力係数 C_L の楕円柱の角度との対応のグラフとその近似式である。後に流体カプログラムで使用するために、3 次式の多項式で近似した式をその下に示した。海流発電システムの挙動解析プログラムの流体力部分のプログラムにおける抗力と揚力の評価は、ここで求めた近似式 3-52 式、3-53 式を使用する。

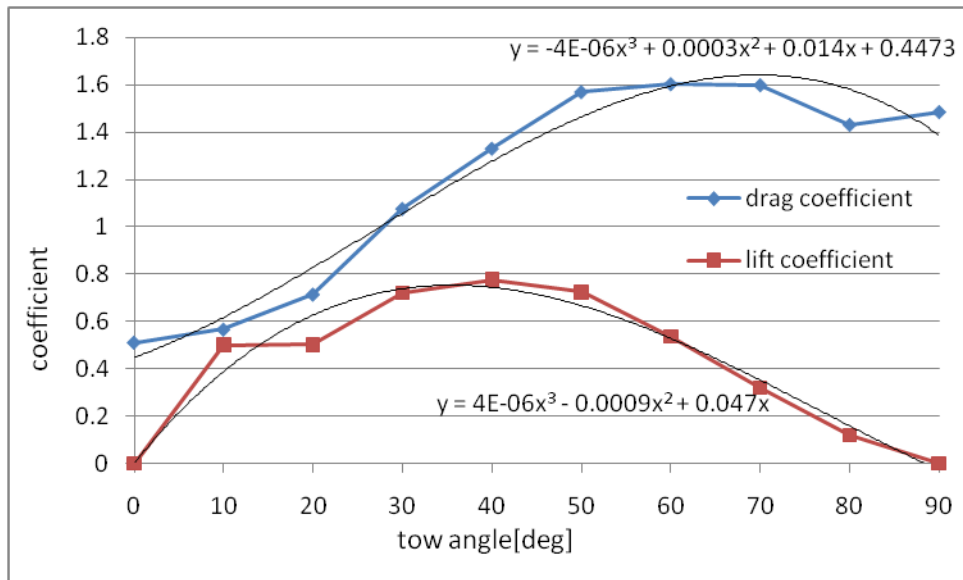


Fig.3-43 楕円柱の抗力係数、揚力係数の近似式(0.08m×0.03m 楕円、長さ 0.6m、流速 0.6m/s)

近似式

$$C_D = -0.000004(\theta \text{ deg})^3 + 0.0003(\theta \text{ deg})^2 + 0.014(\theta \text{ deg}) + 0.4473 \quad 3-52$$

$$C_L = 0.000004(\theta \text{ deg})^3 + 0.0009(\theta \text{ deg})^2 + 0.047(\theta \text{ deg}) \quad 3-53$$

今回の実験では 2 種類の縦横比の楕円を用いた。抗力係数、揚力係数ともに同様の挙動を示したが、絶対値が少し違うため、ほかの縦横比の場合についても実験することができれば、より詳細で有用なデータが得られると考えられる。

3.2.5 ロータと浮体の相互干渉効果計測実験

作成するプログラムの流体力評価は、構造全体を構成する個々の部材に作用する流体力を単純に足し合わせて、全体に作用する流体力を求めるというものである。この算定法は、細かい部材で構成され、個々の部材間に相互干渉が無い場合には精度良く求めることができる。しかし、部材間に相互干渉が生じて、個々の部材に作用する流体力を足し合わせて全体の流体力を評価する方法が適用できない可能性がある。その可能性として、海流発電装置のロータと支持構造間の相互干渉が考えられる。ロータ後流では、流速が落ちるので、全体抵抗が大きく減少する可能性がある。この点を実験から明確にする必要がある。

そのため以下の 3 つの実験を行いロータと支持構造間の相互干渉について評価した。相互干渉の影響を計測する実験としては 1) ロータ単独の抵抗計測、2) 浮体構造物単独の抵抗計測、3) ロータと浮体構造物を組み合わせたときの全体抵抗計測を行い、1) + 2) - 3) を評価する必要がある。抵抗実験施設は東京大学本郷キャンパスの船型試験水槽を使用した。

以下は

ロータ(多孔板)単独の抵抗計測実験

浮体構造物抵抗計測実験

に分けて説明する。

・実験目的

この実験の目的は、海流発電装置のタービンと支持構造間の相互干渉効果の検証である。個々の部材に作用する流体力を足し合わせて全体の流体力を評価できることの確認をする。

・実験方法

以下の条件で測定を行った。

実験装置を使用した、荷重測定

実験装置を、速度を変えながら曳航し、実験装置にかかる抵抗を測定した。

・実験条件

以下の条件で曳航実験を行った。

曳航速度：0.1m/s、0.2m/s、0.3m/s、0.4m/s、0.5m/s、0.6m/s

3.2.5.1 ロータ(多孔板)単独の抵抗計測実験

ロータの代わりに等価な多孔板を用いた多孔板単独の抵抗計測実験を行った。曳航時に稼働しているロータと同様の抵抗を実現するため Fig.3-44 のような多孔板を用いた。

Fig.3-45 は実際に使用した多孔板の写真である。

実験装置は断面 0.08m×0.03m、高さ 0.6m の多孔板なしの楕円柱 1 と、断面 0.08m×0.03m、高さ 0.6m の多孔板ありの楕円柱 2 である。この楕円柱 1 と楕円柱 2 をそれぞれ 0.1m/s、0.2m/s、0.3m/s、0.4m/s、0.5m/s、0.6m/s の一定速度で曳航して抵抗を測定した。そして(楕円柱 2 の抵抗)-(楕円柱 1 の抵抗)を計算し、多孔板単独の抵抗を求めた(Fig.3-46)。

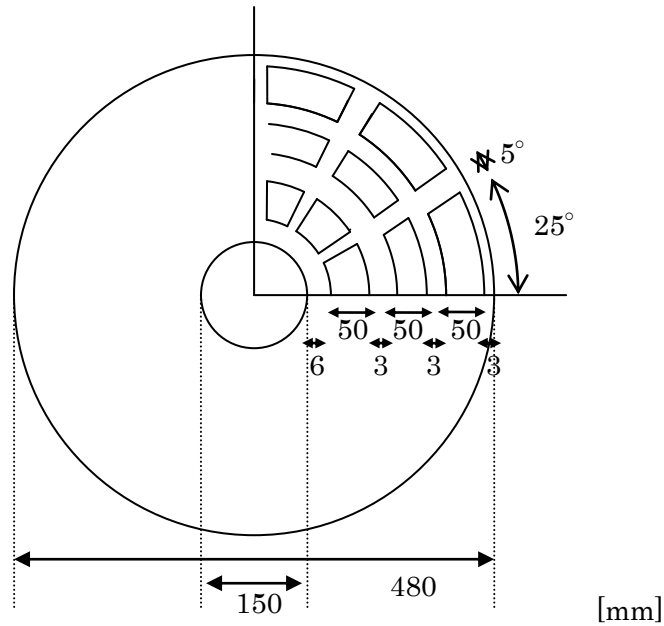


Fig.3-44 多孔板の図



Fig.3-45 実験で用いた多孔板

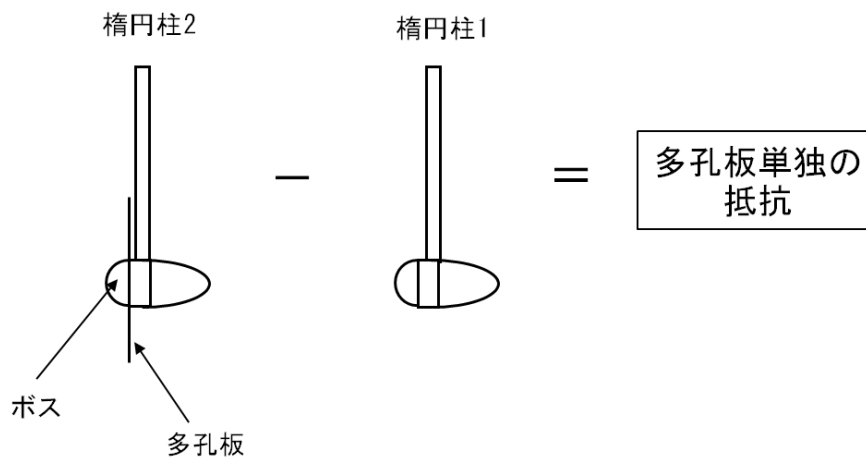


Fig.3-46 多孔板単独の抵抗の計算方法

・実験装置

実験装置は楕円柱1と楕円柱2の両端に端板を取り付け、その上に検力計を水面より上に出すための接続パイプと、検力計を接続したものである。これを曳航台車と接続して、装置の曳航速度を変えながら計測を行った。Fig. 3-47とFig. 3-48は曳航中の写真である。



Fig.3-47 楕円柱 1 の曳航中の写真

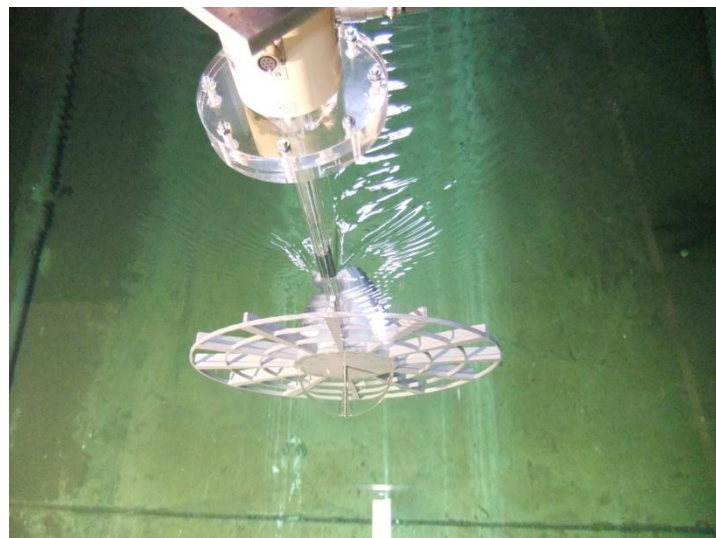


Fig.3-48 楕円柱 2 の曳航中の写真

・実験結果

Fig.3-49 は楕円柱 2 を角度 0deg、速度 0.6m/s で曳航したときのデータであるが、ノイズや装置の振動の影響が大きく出ている。まずノイズを取るために前後 100 データで平均値をとってノイズを除去したものが、Fig.3-50 である。次に、速度が一定になって安定した部分で平均値をとり、電圧から荷重を計算する。Fig.3-51 は楕円柱 1 の各曳航速度における荷重の平均値、Fig.3-52 は楕円柱 2 の各曳航速度における荷重の平均値である。また楕円柱 2 の荷重から楕円柱 1 の荷重をひき、多孔板単独の荷重を求めた。それが Fig.3-53 である

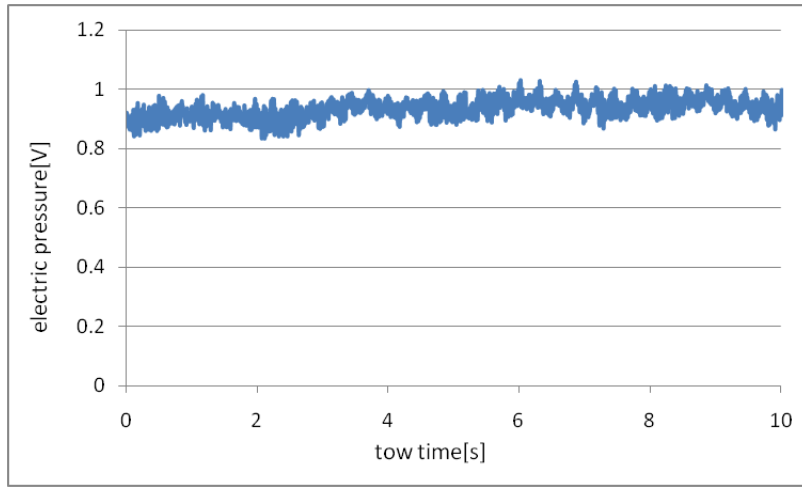


Fig.3-49 楕円柱 2 を速度 0.6m/s で曳航した時の電圧値の変化

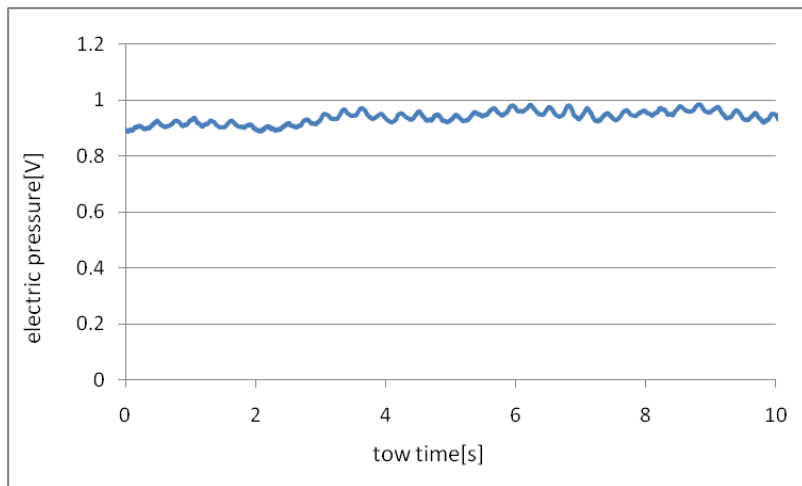


Fig.3-50 楕円柱 2 を速度 0.6m/s で曳航した時の電圧値の変化（ノイズ除去後）

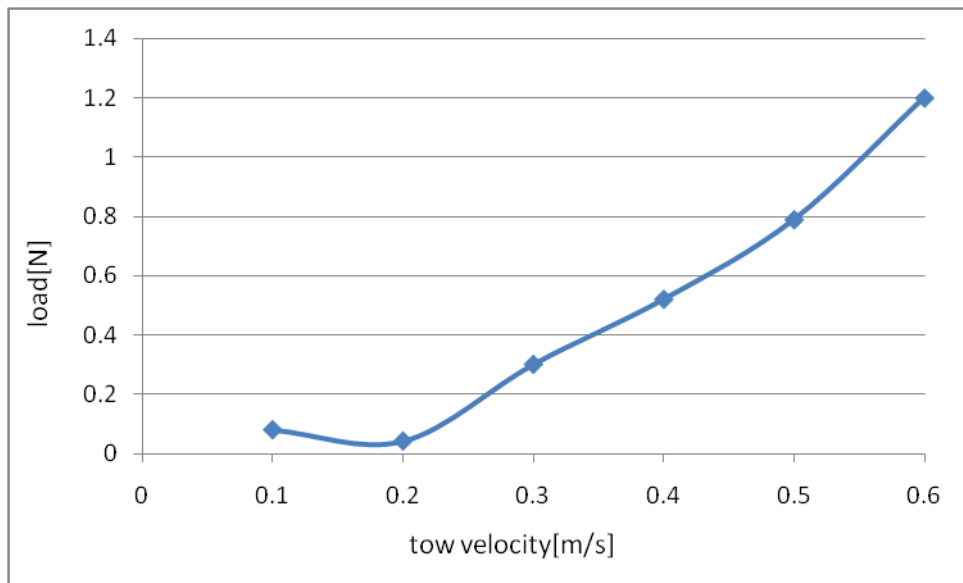


Fig.3-51 楕円柱 1 の曳航速度と荷重

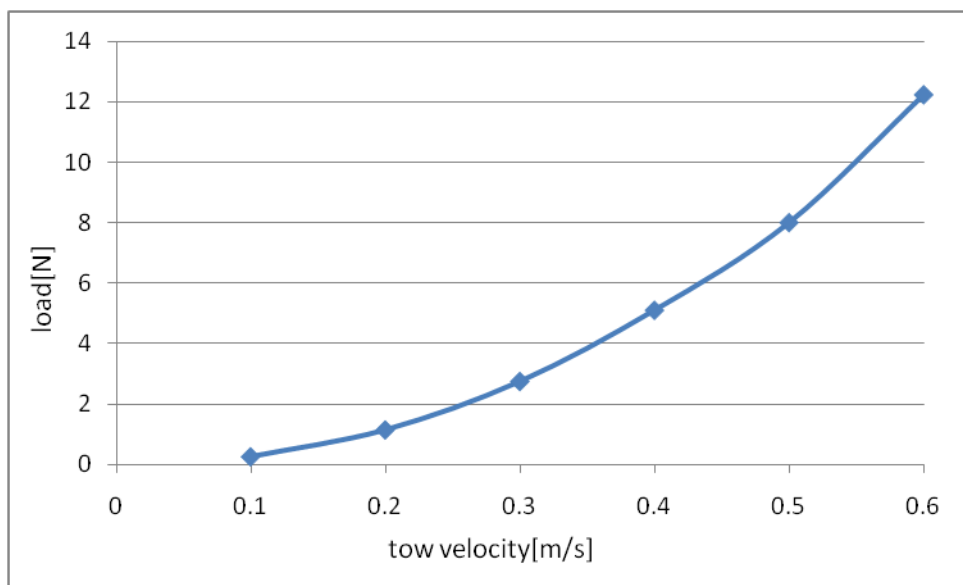


Fig.3-52 楕円柱 2 の曳航速度と荷重

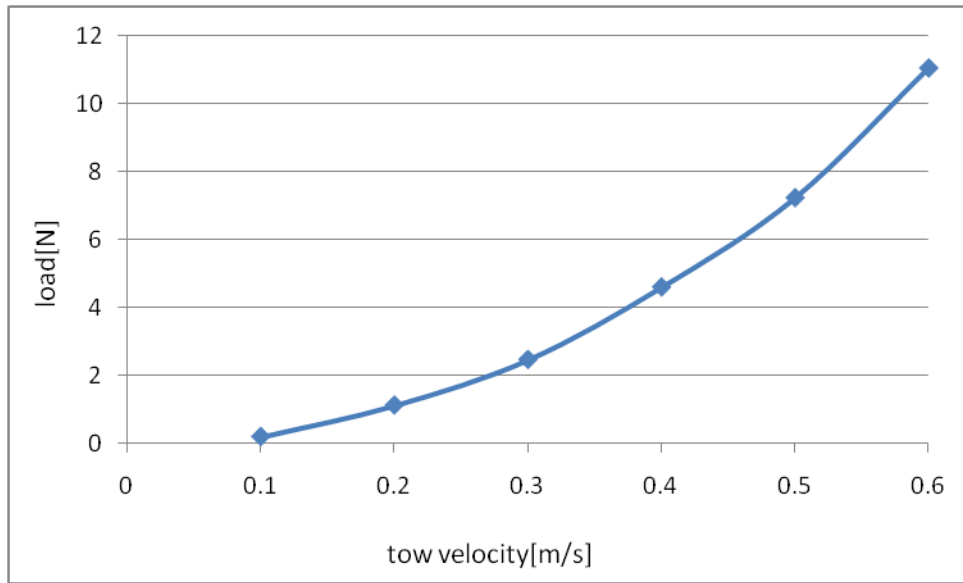


Fig.3-53 多孔板単独の曳航速度と荷重

3.2.5.2 浮体構造の抵抗計測実験

一様流中で海流発電システムに発生する荷重を測定するために、実験模型の曳航実験を行った。実験には海流発電システムの 50 分の 1 模型を使用した。

実験模型は Fig.3-55 のような形状をしており、製造上の都合等で実際の海流発電システム (Fig.3-54) とは異なる部分がある。実機で楕円柱を使用している部分は、断面が楕円ではなく長方形の両端に半円形を付加した形状になっている。これは模型製作上の都合で、楕円柱を正確に成形することが難しいために、このような形状になった。また、実機と比べてナセル部分大きい。ナセル部分に発電装置を搭載しているためで、これによって、システムの動揺や、骨組みの後流が発電量に与える影響を評価するための実験を行えるようにしている。実験模型は 50 分 1 と小さいが、複雑な機構を持つ発電機部分はそれほど小さくすることができないためである。

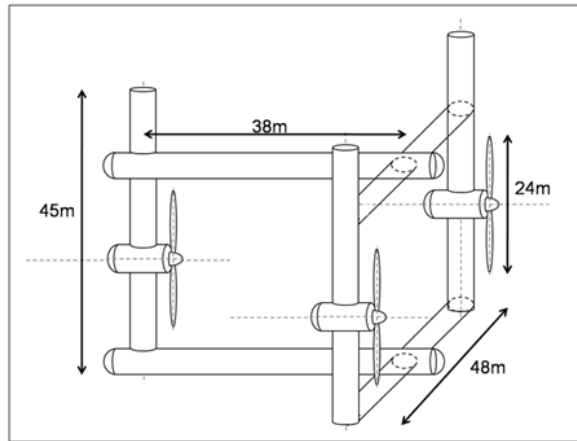


Fig.3-54 提案している海流発電用プラットフォーム

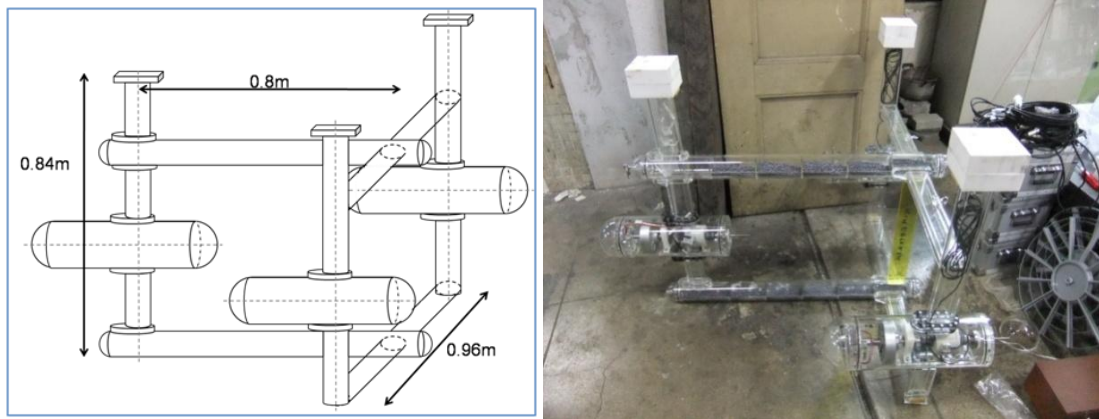


Fig.3-55 海流発電用プラットフォームの実験模型

・実験装置

・実験装置は多孔板を取り付けていない実験模型1 (Fig.3-56) と多孔板を取り付けた実験模型2 (Fig.3-57) の水面を貫通する3点に検力計を設置したものである (Fig.3-58)。これを曳航台車と接続して、装置の曳航速度を変えながら計測を行った。Fig.3-59 は実験模型と流れの方向で、Fig.3-60 は曳航中の写真である。

実験模型1 と実験模型2 をそれぞれ曳航速度 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6m/s で曳航し、三点の検力計はそれぞれのX方向の荷重を測定した。



Fig.3-56 実験模型 1 の写真



Fig.3-57 実験模型 2 の写真

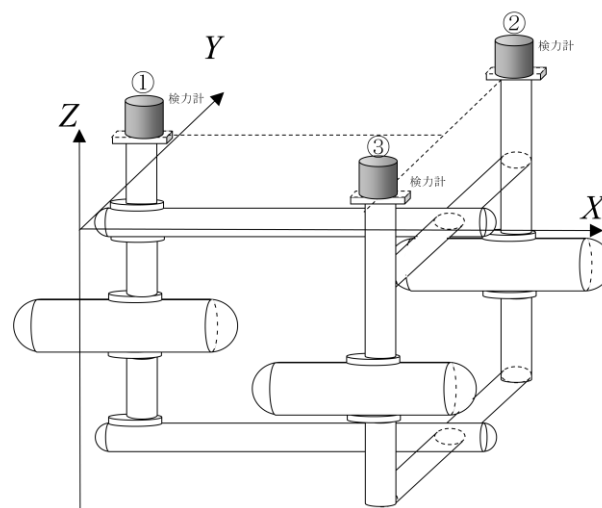


Fig.3-58 実験模型に検力計を設置した図

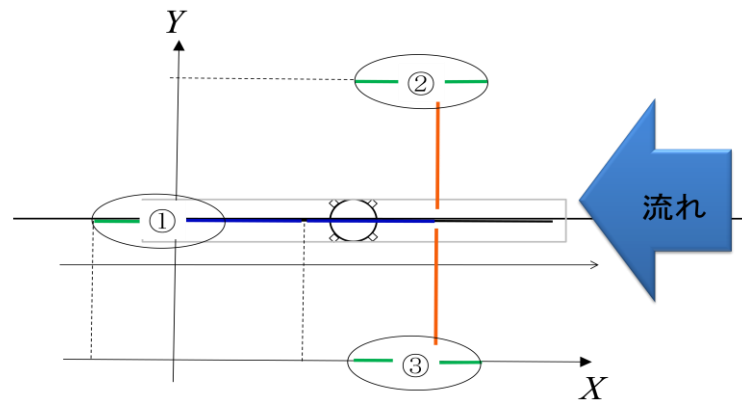


Fig.3-59 実験模型と流れの方向

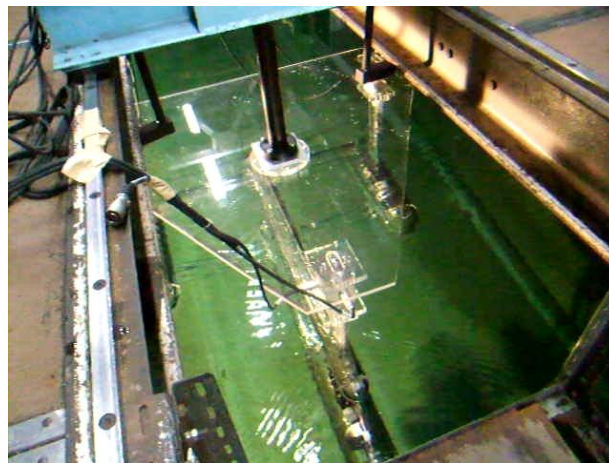


Fig.3-60 実験の様子

・実験結果

Fig.3-61 は実験模型 2 を速度 0.6m/s で曳航した時の出力データであるが、大きな荷重変動を拾っている。この荷重は曳航電車の振動によるものと考えられるため、これを取り除いて一定な流体力を評価しなければならない。そのため、連続する 100 データで平均値を取ってノイズを取り除いた。Fig.3-61 のデータからノイズを除去したものが、Fig.3-62 である。次に、速度が一定になって安定した部分で平均値をとり、電圧から荷重を計算する。Fig.3-63 は各曳航速度における実験模型 1 の荷重の平均値、Fig.3-64 は各曳航速度における実験模型 2 の荷重の平均値である。

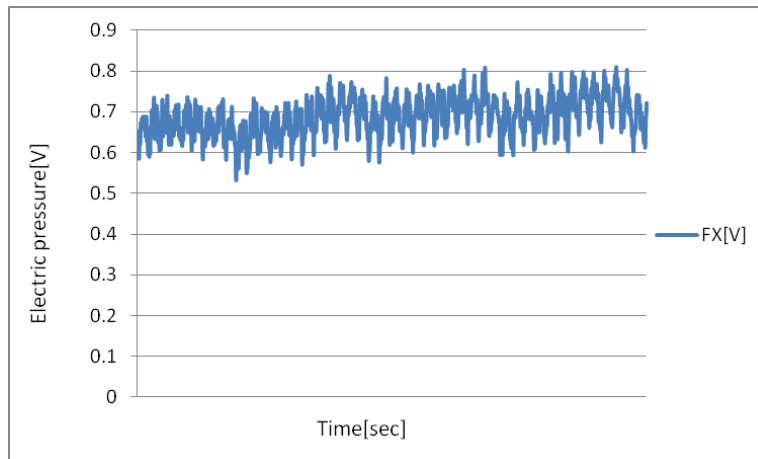


Fig.3-61 実験模型 1 を速度 0.6m/s で曳航した時の電圧値の変化

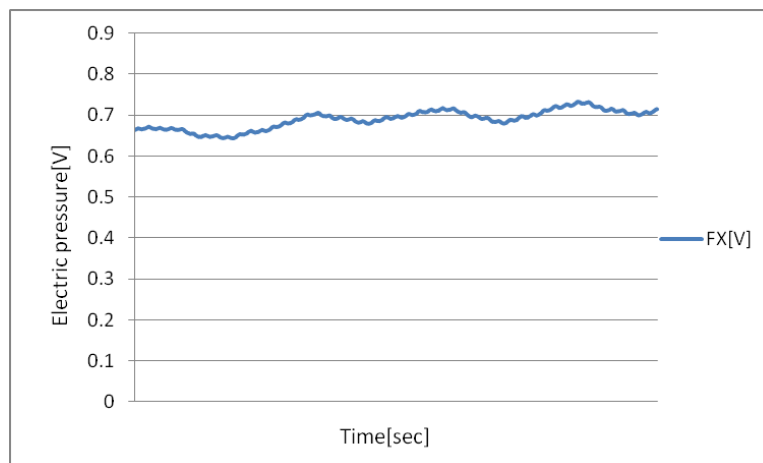


Fig.3-62 実験模型 1 を速度 0.6m/s で曳航した時の電圧値の変化

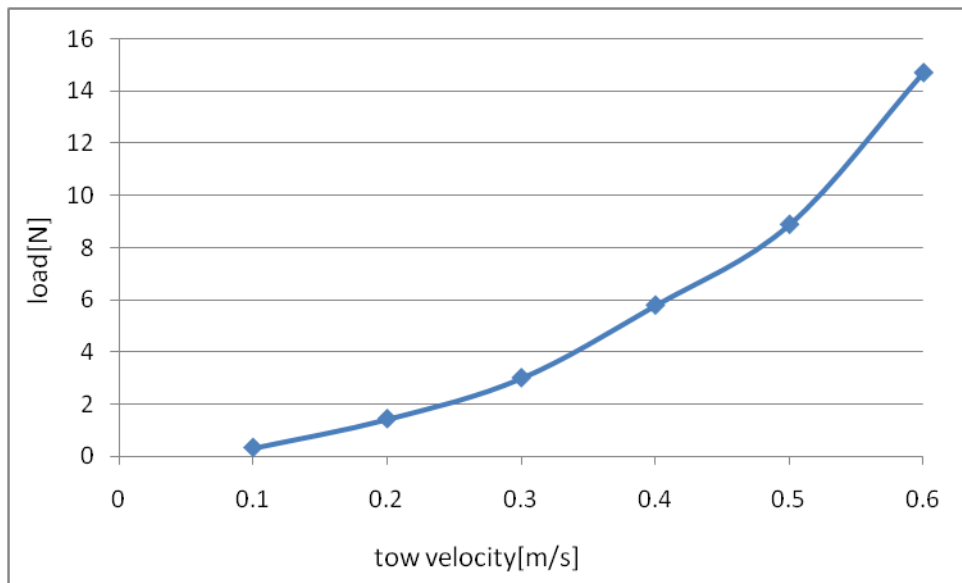


Fig.3-63 実験模型 1 の曳航速度と荷重の関係

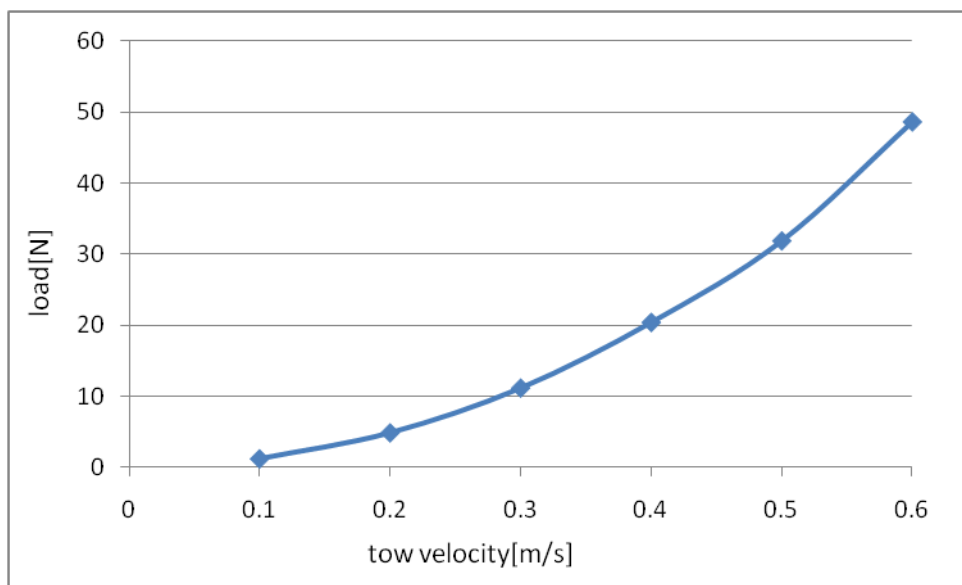


Fig.3-64 実験模型 2 の曳航速度と荷重の関係

3.2.5.3 結果の考察

Fig.3-65 は(計測した多孔板単独の荷重×3+計測した多孔板を取り付けていない浮体構造物の荷重)と(計測した多孔板を取り付けた浮体構造物の荷重)を比較したものである。多孔板直後の鉛直部材に流入する流速は、多孔板がエネルギーを吸収することにより低下している(運動量理論によると流速は13~14%低下していると考えられる)と考えられるが、実験結果では、(多孔板単独の荷重×3+浮体構造物の荷重)と(浮体構造物と多孔板一体の荷重)はほぼ同じ値であった。このことから、実験模型においては、多孔板による流れへの干

渉はなく、モリソン式ベースの流体力評価は正確に行われていると考えられる。よって本研究において、ロータと浮体構造物の干渉効果は考慮しないものとする。

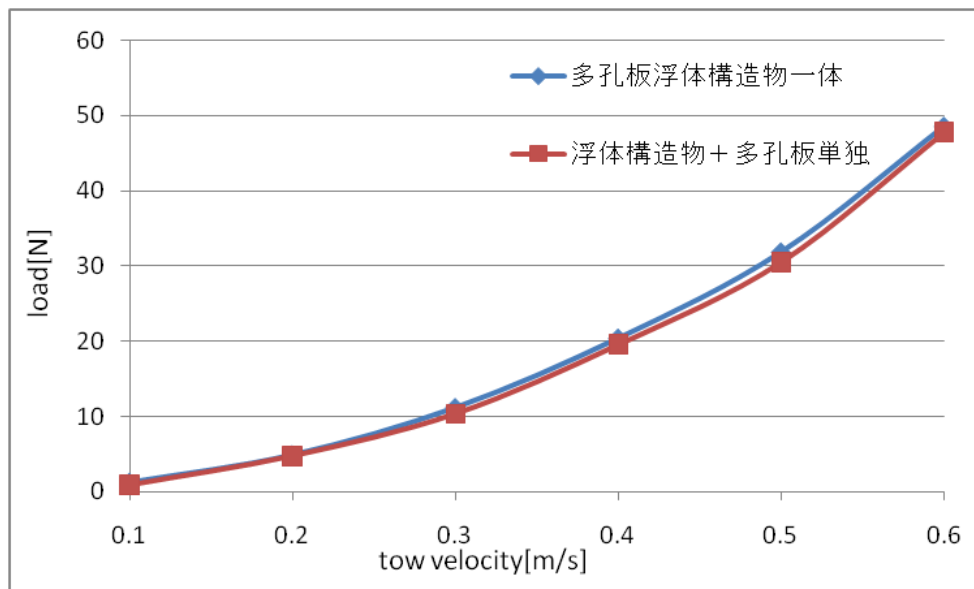


Fig.3-65 干渉効果の確認

3.3 海流発電の動的応答解析プログラムの作成

作成した骨組構造物の動的応答解析プログラムと流体力プログラムを組み合わせ、海流発電用プラットフォームの時間領域の動的応答解析プログラムを作成した。Fig.3-66 はプログラムのフローである。

骨組構造物の節点数、要素数、節点座標、接続情報、材料情報、計算条件、流体の波高、角速度を入力すると各節点の時刻歴の変位と各要素での応力が得られる。

ここまででプログラムは完成であるが、完成したプログラムの計算結果の妥当性を確かめる必要がある。このことについては、次章で模型実験の結果と比較することによって検証していく。

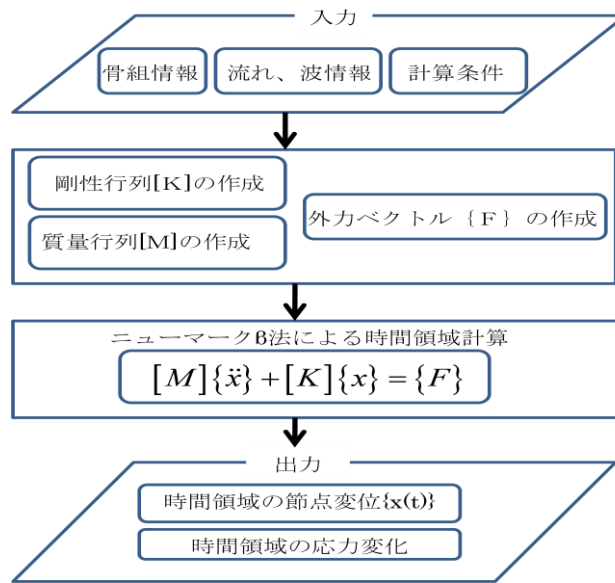


Fig.3-66 海流発電用プラットフォームの動的応答解析プログラムのフロー

4. プログラムの検証実験

提案している海流発電用プラットフォームの 50 分の 1 模型を使用し、波浪中の変位測定実験を行った。

本実験の目的は、前章までで作成した海流発電用プラットフォームの動的応答解析プログラムの妥当性の評価である。模型実験による応答測定と作成した海流発電用プラットフォームの動的応答解析プログラムによる応答解析が同じ結果となれば海流発電用プラットフォームの動的応答解析プログラムの妥当性を確認できる。

この目的のために、以下の実験を行った。

ワイヤーを用いて、実験模型をできるだけゆるく係留し、そこに波をあてて、実験模型のヒープ方向の変位を測定する。

4.1 実験装置

本実験では、前章の浮体構造物の曳航実験で使用した海流発電用プラットフォームの 50 分の 1 模型を使用した(Fig.4-1)。

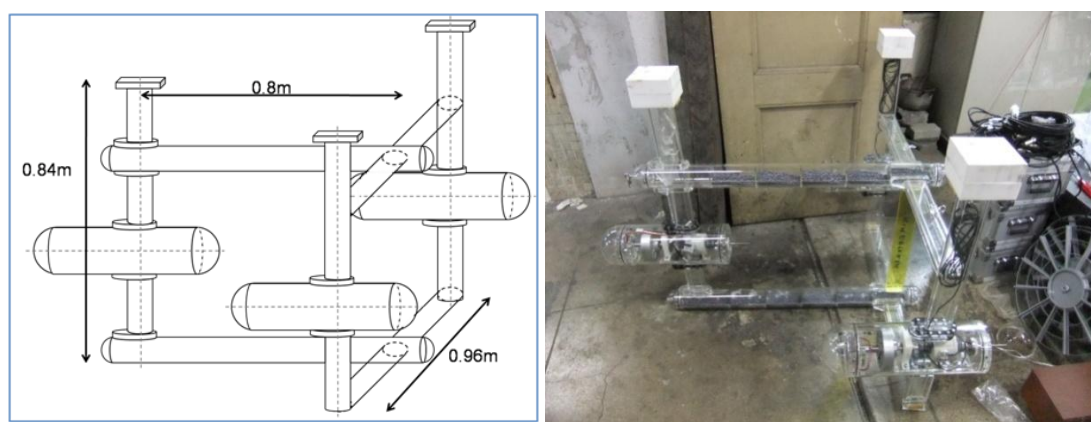


Fig.4-1 海流発電用プラットフォームの実験模型

4.2 造波実験

実験模型にさまざまな波をあてて模型全体に発生するヒープ方向の変位を測定した。変位の測定は実験模型の端部の三点に上部にレーザー変位計(Fig.4-2)を取り付けて測定した(Fig.4-3)。測定する変位は実験模型の水面を貫通しているカラムの三点である。また Fig.4-4 は波と実験模型の方向である。

調べたいことは以下のような項目に分けられる

- ・波高と模型の鉛直方向の変位
- ・波の周波数と模型の鉛直方向の変位の関係

これらを調べるために、次のような実験を行った。

1 波の周波数と変位の関係を調べるために、波高を一定にして波の周期を変化させて実験模型のヒープ方向の変位を計測し、波高と実験模型の鉛直方向の変位の関係のグラフを作成する。

2 波高一定で周波数を変えて計測し、波高一定での周波数と変位の関係を求める。これによって、実験模型に大きな変位が発生する周波数領域、波長領域を調べ、考察する。

以下の条件で測定を行った。

波高：3[cm]、6[cm]、9[cm]

波周期：1.0[s]、0.9[s]、0.8[s]、0.7[s]

Fig.4-5 は実験の様子の写真である。



Fig.4-2 実験で使ったレーザー変位計

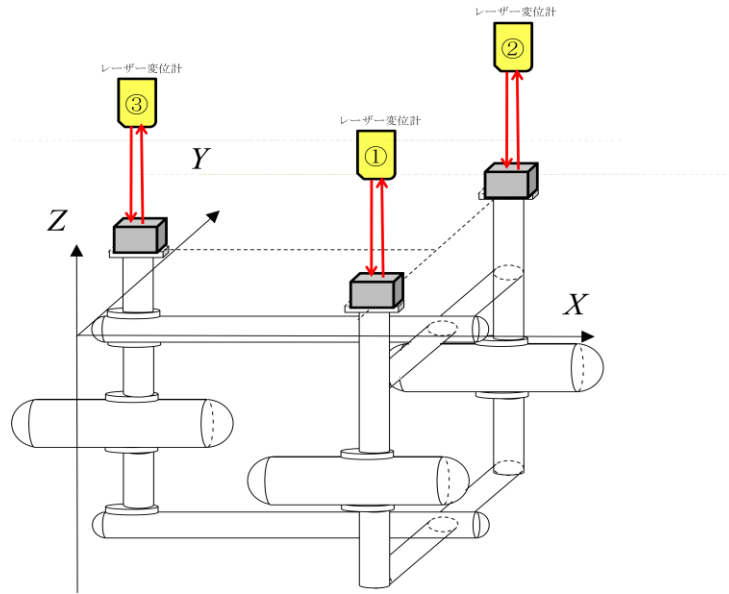


Fig.4-3 実験模型の変位測定位置

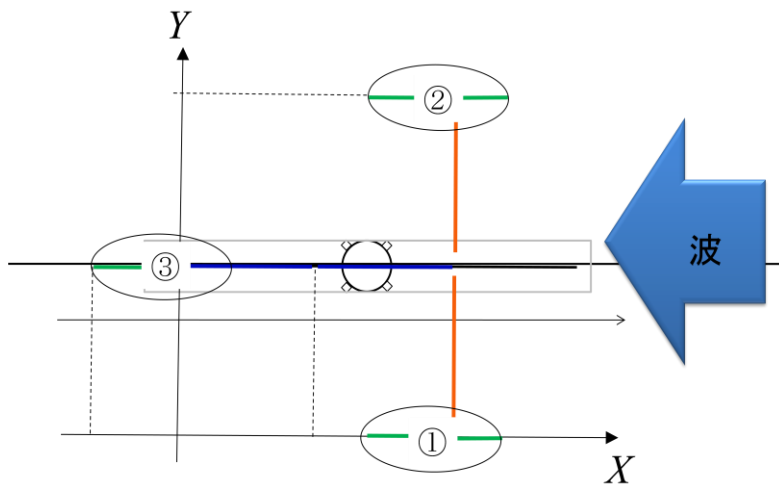


Fig.4-4 波と実験模型の方向

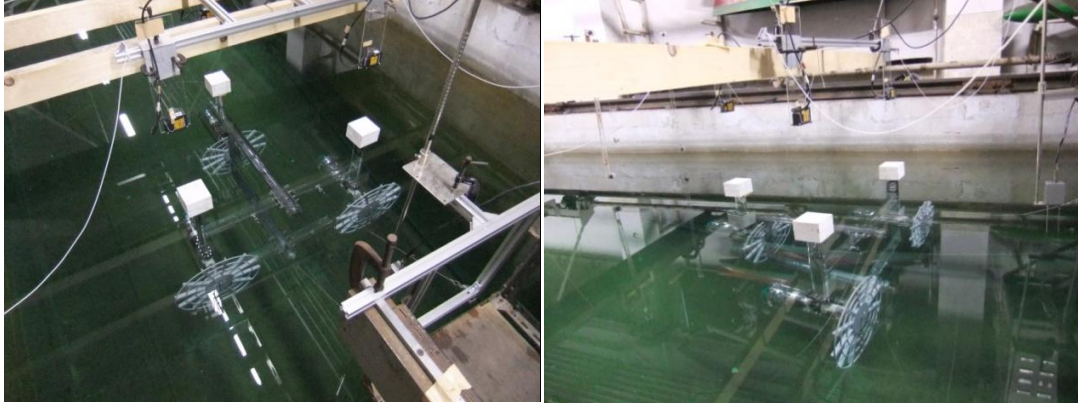


Fig.4-5 造波実験の様子

4.2.1 実験データ

最初に、波高 3cm で周期 1.0、0.9、0.8、0.7s の波をかけた時の波高と各点における変位の時間変化を示す (Fig.4-6~Fig.4-9)。次に波高 6cm で周期 1.0、0.9、0.8、0.7s の波をかけた時の波高と各点における変位の時間変化を示す (Fig.4-10~Fig.4-13)。最後に波高 9cm で周期 1.0、0.9s の波をかけた時の波高と各点における変位の時間変化を示す (Fig.4-14~Fig.4-15)。波高 9cm の周期 0.8、0.7s の波は波の形が崩れていたため測定しなかった。それぞれの図の①、②、③は Fig.4-3 のレーザー変位計①、②、③で測定した変位である。

波高の時間変化をみると、周期が 1.0、0.9、0.8s のときには波形が綺麗なサインカーブを描いているが、周期 0.7s では波形が不安定になっていることが分かる。よって、周期によっては波形がサインカーブにならないことを頭にとめておく必要がある。

変位より波を先に検出しているが、これは波高計を実験模型の造波機寄りの位置に設置したためである。

実験結果の Fig.4-6~Fig.4-15 を見ると、周期 8.0s ほどの振動に小さな周期の振動があるのがわかる。模型の固有振動に波の振動が乗っていると考えられる。

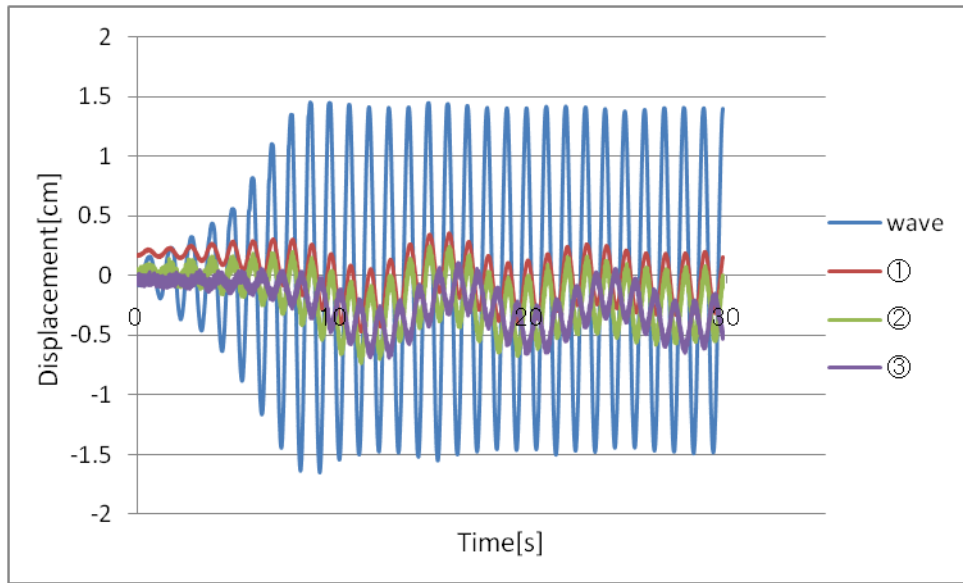


Fig.4-6 波高 3cm、周期 1.0s

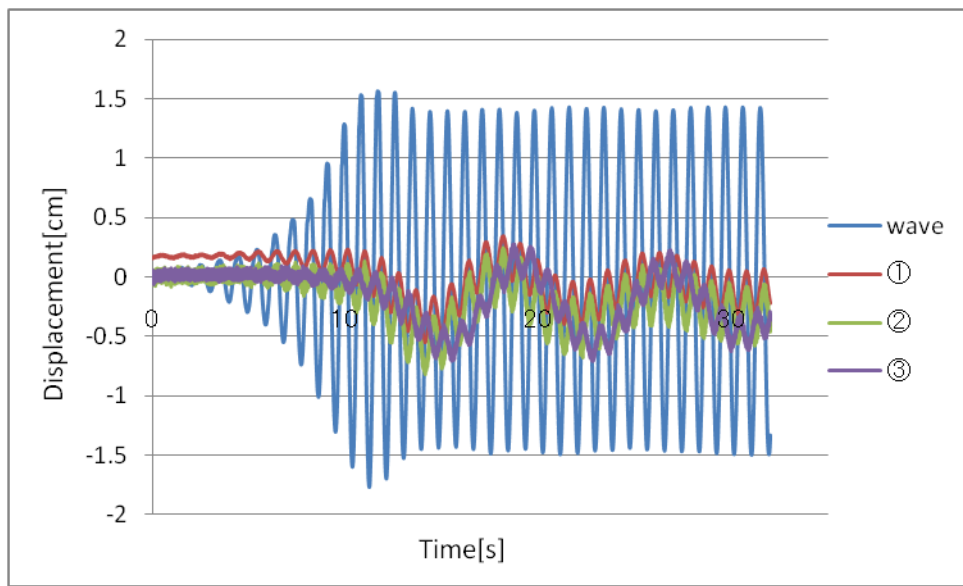


Fig.4-7 波高 3cm、周期 0.9s

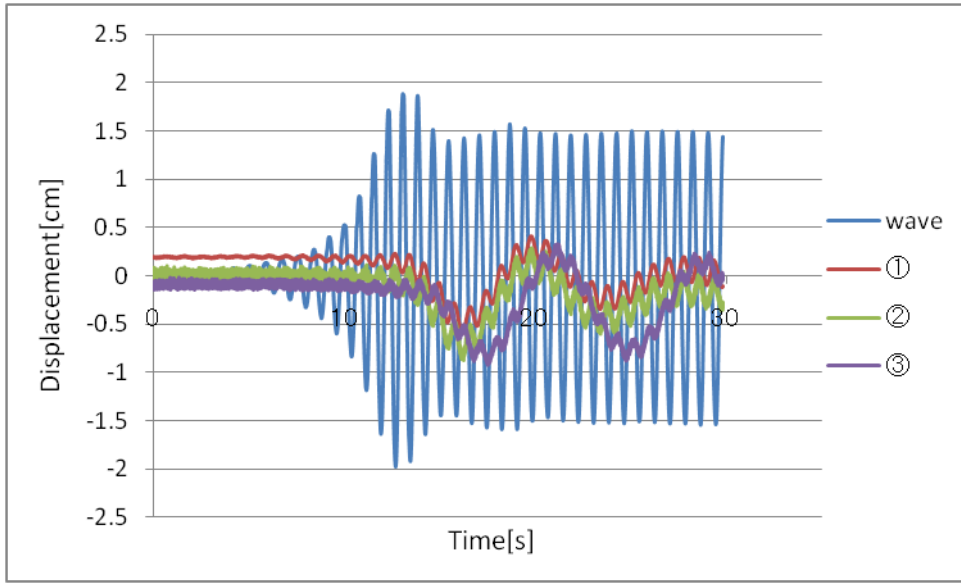


Fig.4-8 波高 3cm、周期 0.8s

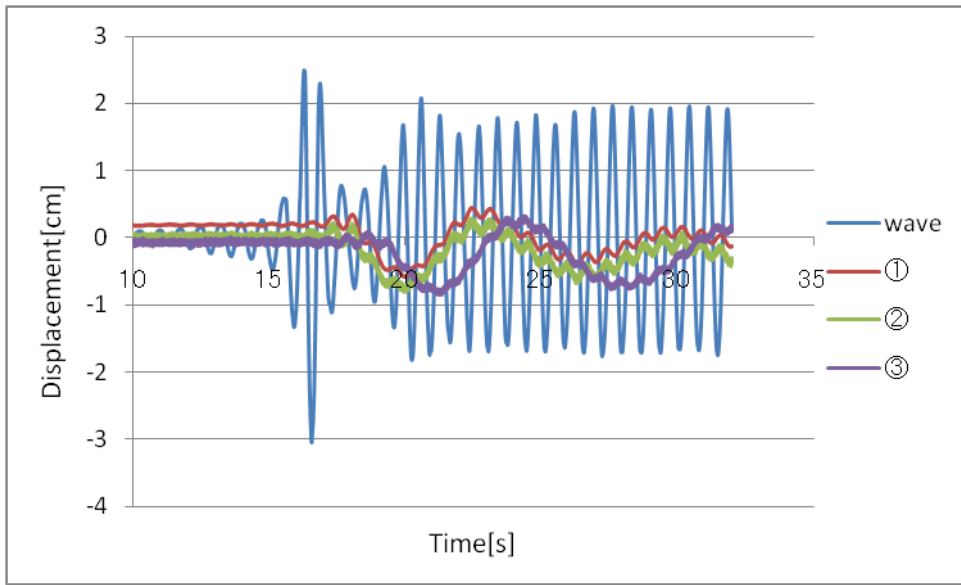


Fig.4-9 波高 3cm、周期 0.7s

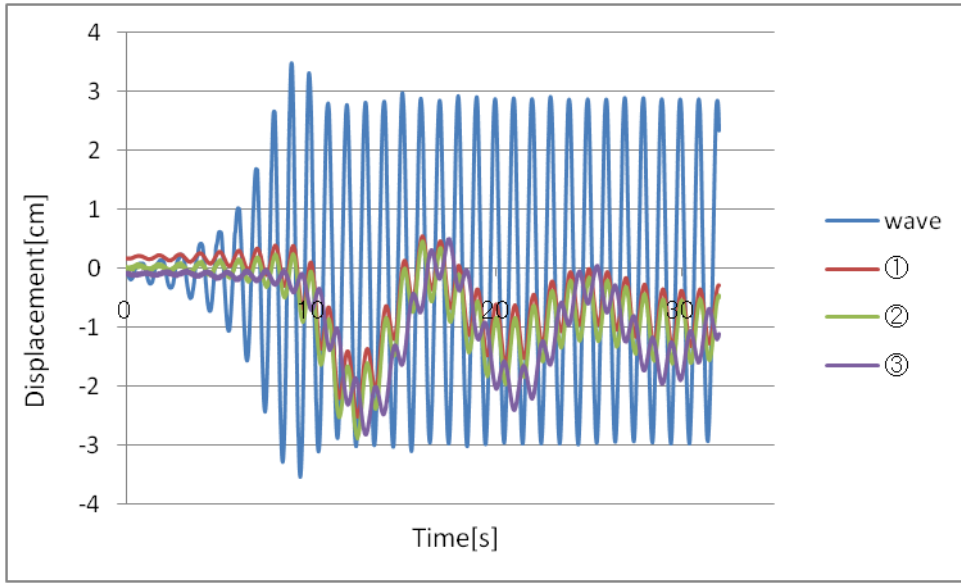


Fig.4-10 波高 6cm、周期 1.0s

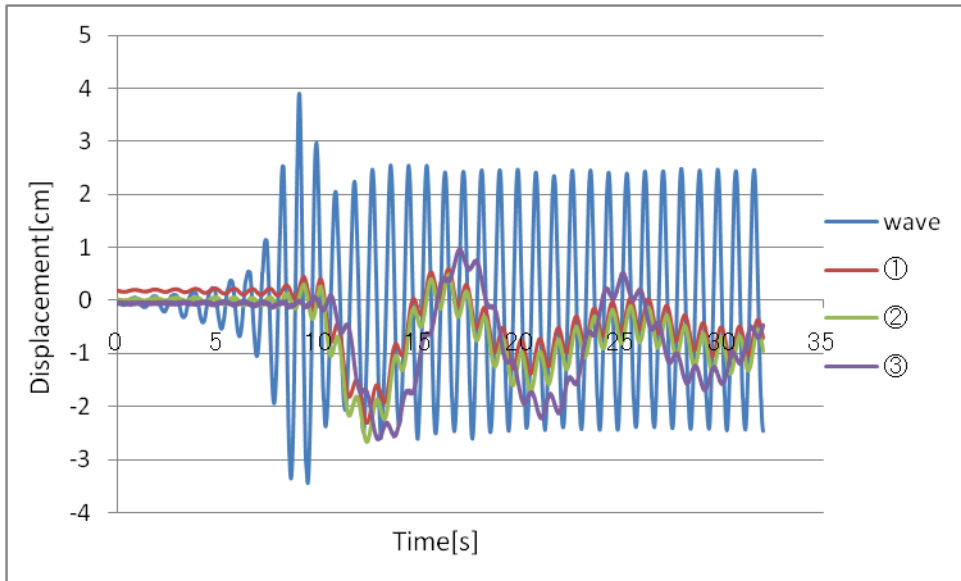


Fig.4-11 波高 6cm、周期 0.9s

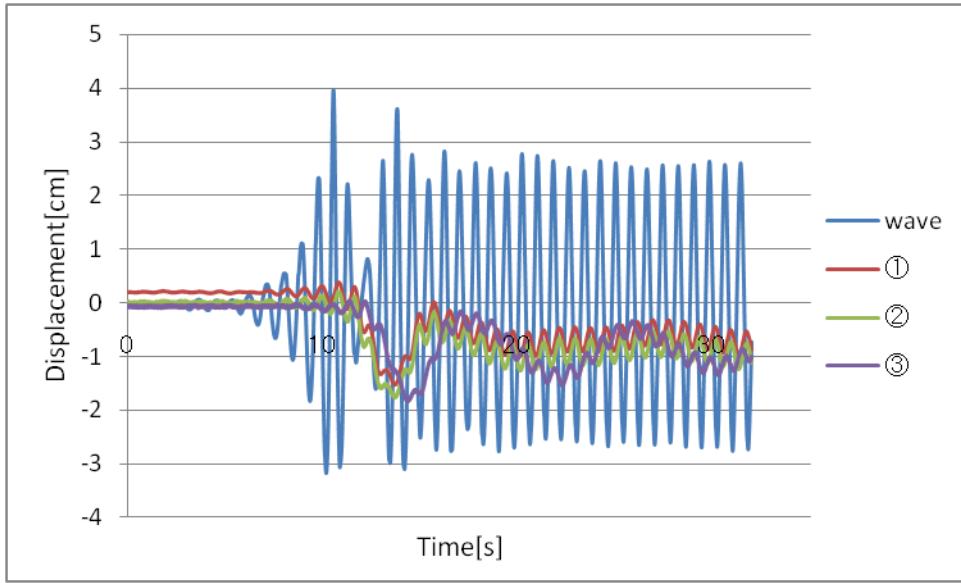


Fig.4-12 波高 6cm、周期 0.8s

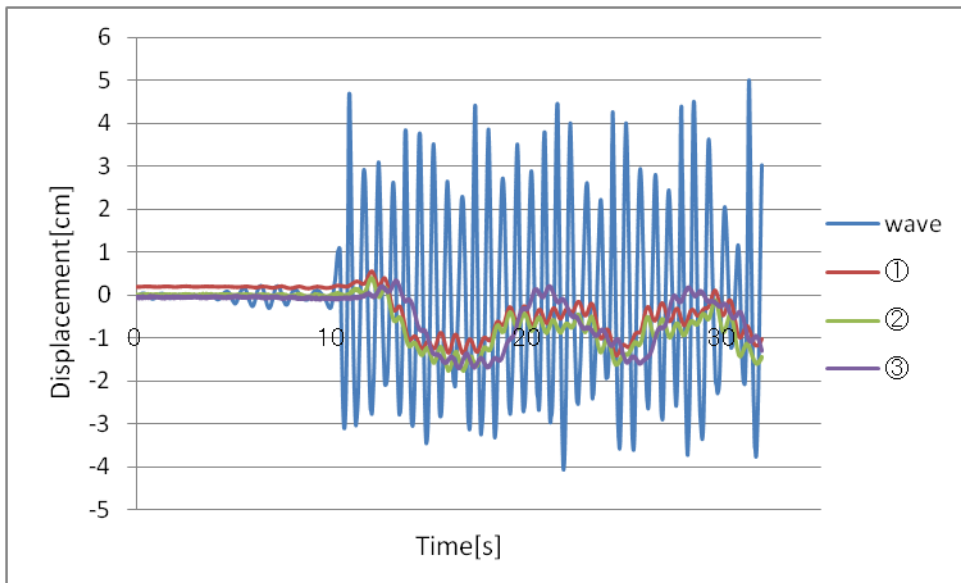


Fig.4-13 波高 6cm、周期 0.7s

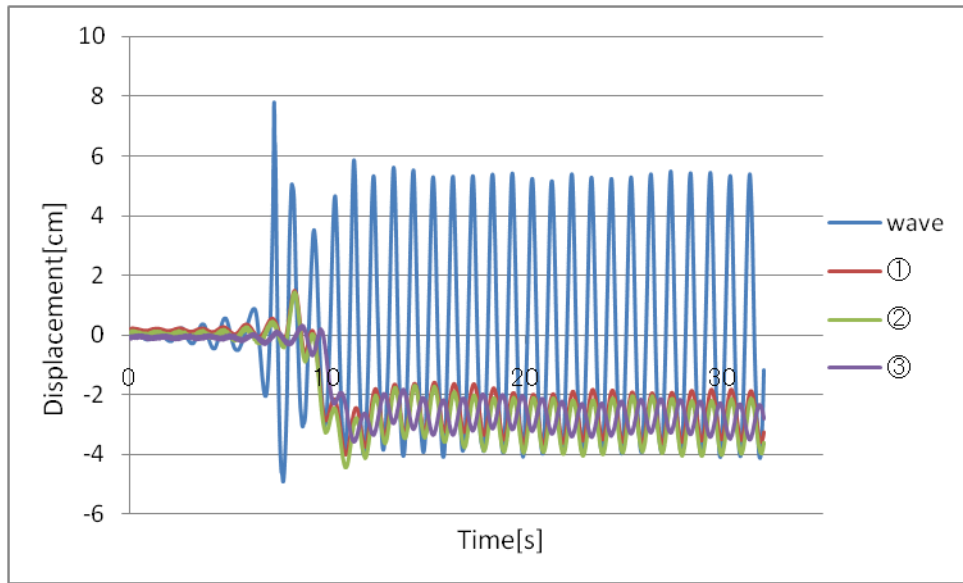


Fig.4-14 波高 9cm、周期 1.0s

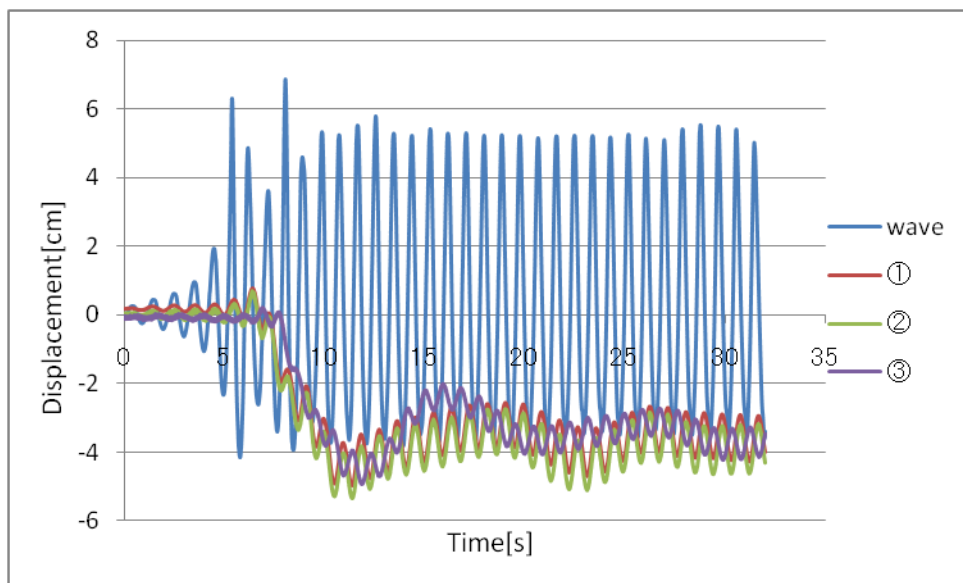


Fig.4-15 波高 9cm、周期 0.9s

4.2.2 波の周波数と応答の関係

造波実験の波の周波数と実験模型の応答の関係を求めた結果が、Fig.4-16 である。横軸が波の周波数[rad/s]で縦軸は実験模型の応答振幅を波の振幅で割った値である。波の周波数が増え、振幅が小さくなる場合でも単位振幅あたりの応答の値が同じことから実験模型は速度の 2 乗に比例する抗力が支配的ではなく系が線形であると考えられる。次の節で測定した実験データとプロ

グラムデータの比較を行う。

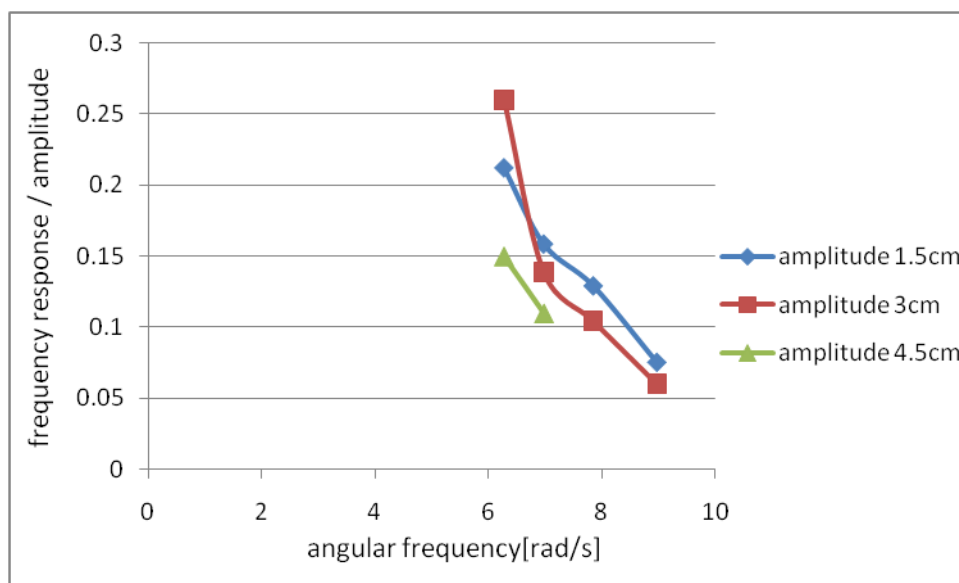


Fig.4-16 波の周波数と応答振幅の関係

4.3 プログラムデータとの比較

ここでは、造波実験の実験結果と、作成した海流発電用プラットフォームの動的応答解析プログラムを用いて実験と同じ条件で計算した数値を比較し、海流発電用プラットフォームの動的応答解析プログラムの妥当性について検討する。

プログラムに入力する骨組情報としては実験模型を 43 要素に分割した情報を入力する。Fig.4-17 に海流発電用プラットフォームの実験模型、Fig.4-18 に実験模型の要素分割図を示す。

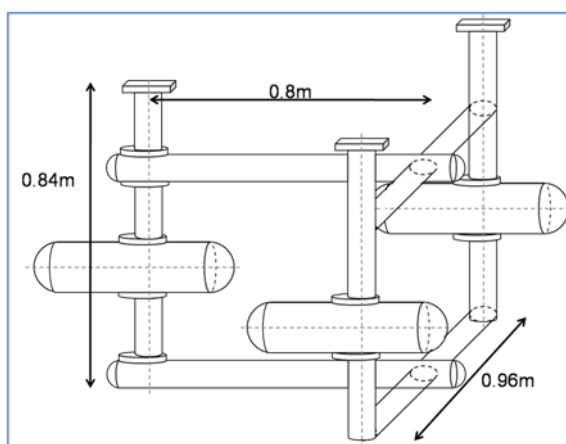


Fig.4-17 海流発電用プラットフォームの実験模型

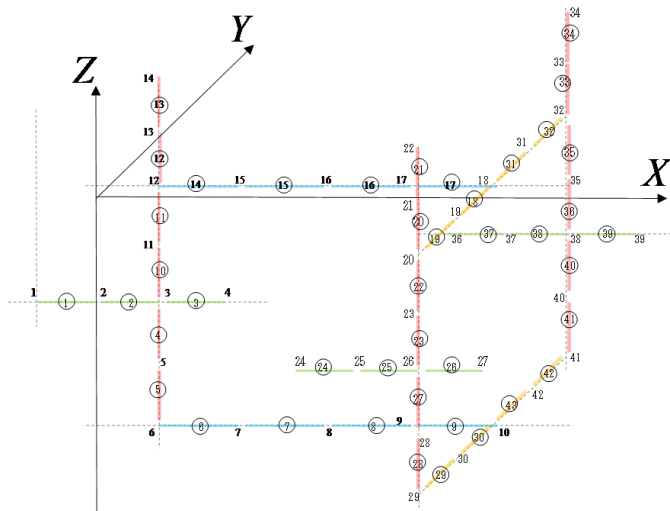


Fig.4-18 実験模型の要素分割図[2]

海流発電用プラットフォームの動的応答解析プログラムを用いて実験で使用した海流発電模型の波振幅 1.5cm、3.0cm の波をかけた時のヒープ方向の応答を計算し、周波数応答曲線を描いた。それを Fig.4-19 に示す。波振幅 1.5cm、3.0cm の両方とも周波数 0.8rad/s 付近でピークが見られる。これは海流発電模型の固有周期であると考えられる。実験で使用した模型の固有周期を計算した。Fig.4-20 は実験で使用した海流発電の模型の図で、Table.4-1 は実験で用いた海流発電模型のヒープの固有周期の計算結果である。ヒープの固有周期は 7.51[s]で周波数は 0.84rad/s であり、Fig.4-19 のピークと一致する。

また Fig.4-19 ではピーク時において振幅 1.5cm と振幅 3.0cm で応答/振幅の値が大きく異なっており、非線形性が見られる。これは流体力の評価が非線形性であるためだと考えられる。

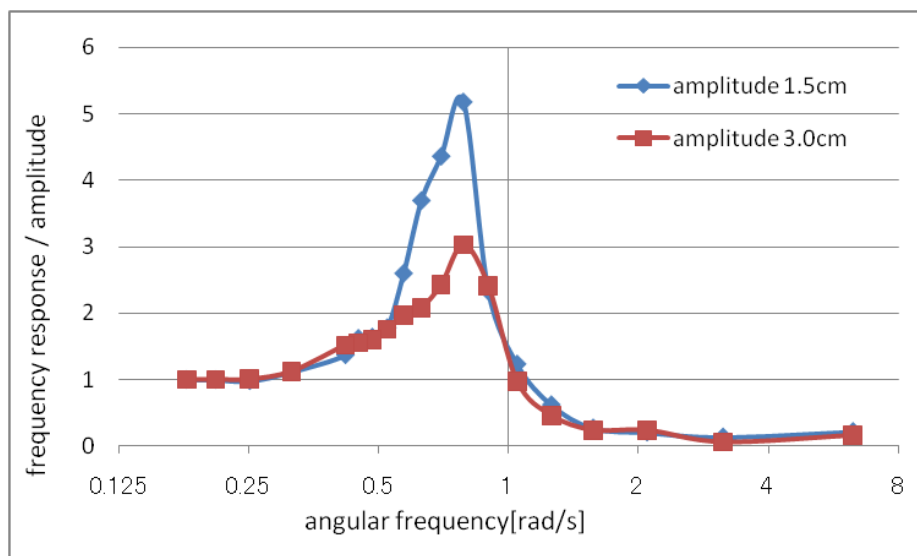


Fig.4-19 実験模型の周波数応答曲線(プログラム計算結果)

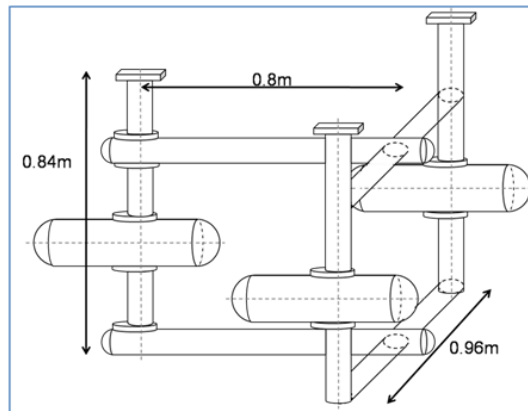


Fig.4-20 実験で使用した海流発電の実験模型

Table.4-1 実験模型の固有周期の計算

総質量[kg]	92.65			部材形状・断面形状		
内訳	構造質量[kg]	付加質量[kg]	長さ[m]	幅[m]	深さ[m]	本数
水平横部材	4.24	9.65	0.08	0.96	0.03	2
ナセル	26.51	26.51	0.4	0.15	0.15	3
水平長手方向部材	10.59	10.59	1	0.08	0.08	2
鉛直部材	4.57	0.00	0.08	0.03	0.69	3
復原ばね	64.88					
固有周波数 [rad/s]	0.84					
固有周期 [sec]	7.51					

また、振幅 1.5cm、振幅 3.0cm において実験の応答/振幅の値とプログラム計算の応答/振幅の値を比較したものが Fig.4-20 である。横軸が波の周波数 rad/s で縦軸は実験模型の応答振幅を波の振幅で割った値である。ほぼ同様の変化を示しているが、測定した周波数が 6.28~8.97rad/s と高周波数領域であったため、応答/振幅の絶対値が小さい。

Fig.4-19 において、実験模型の固有周期でのピークが見られることや、Fig.4-21 の相関性から、プログラムは正しく計算されていると考えられる。作成した海流発電システムの動的応答解析プログラムの妥当性を確認できた。

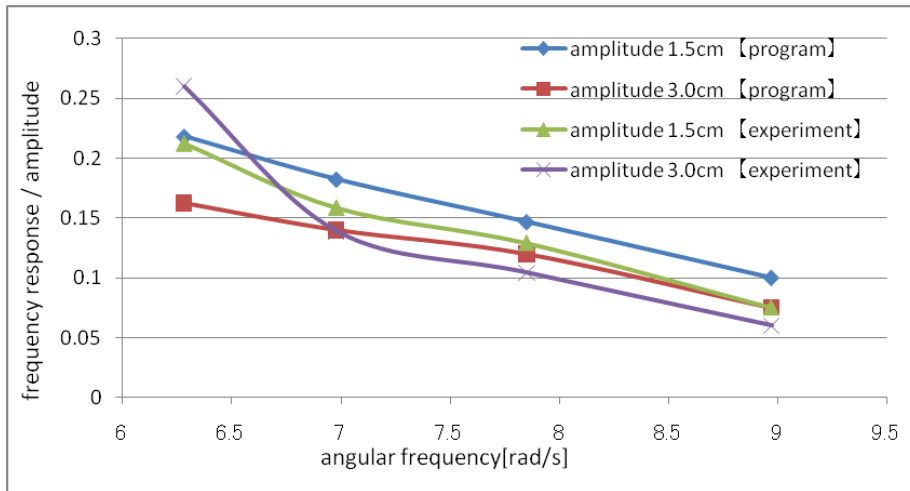


Fig.4-21 実験値とプログラム値の比較

5. 海流発電の技術的成立性の検討

ここでは、作成した海流発電用プラットフォームの動的応答解析プログラムを実際に使用して、提案している海流発電用プラットフォームの構造的成立性について検討する。提案している海流発電用プラットフォームの骨組情報を、作成した海流発電用プラットフォームの動的応答解析プログラムに入力し、プラットフォーム各部の応答や応力を計算する。

5.1 提案している海流発電用プラットフォーム

Fig.5-1 と Fig.5-2 に本研究室で提案している海流発電用プラットフォームの図を示す。このプラットフォームの特徴として、以下のことが挙げられる。

- ・ 中間ブイを用いた一本係留の浮体式システム
- ・ 骨組構造が海面を貫通
- ・ 一つの骨組構造に複数のロータを搭載
- ・ 細い要素による骨組構造
- ・ 骨組に楕円柱を使用

一本係留としているのはプラットフォームが海流に流されることによって安定するからで、複数本係留を用いる場合よりもコストを低く抑えられる。中間ブイを使用しているのは海流に流されたときに水面下に沈まないようにするためである。常に水面に位置することで上下運動の安定性を確保することができる。

骨組構造が海面を貫通するようにしているのは上下方向の安定を保つためである。発電システムを水面下に設置した場合、浮力と重量が釣り合って上下方向に不安定となるため上下の動きを制御する機構が必要になる。このような制御機構は故障の危険があるためなるべく使用しない方が良く考え、プラットフォームは海面に設置することとした。また、プラットフォームは鋼構造とする。

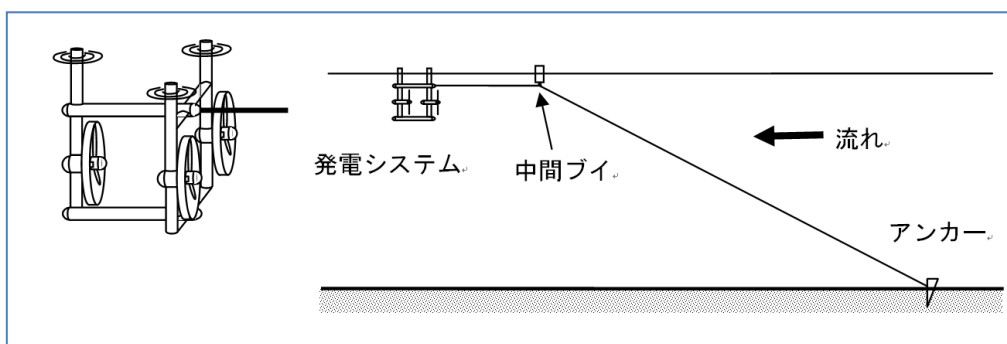


Fig.5-1 本研究室で提案している海流発電の図 1 [1]

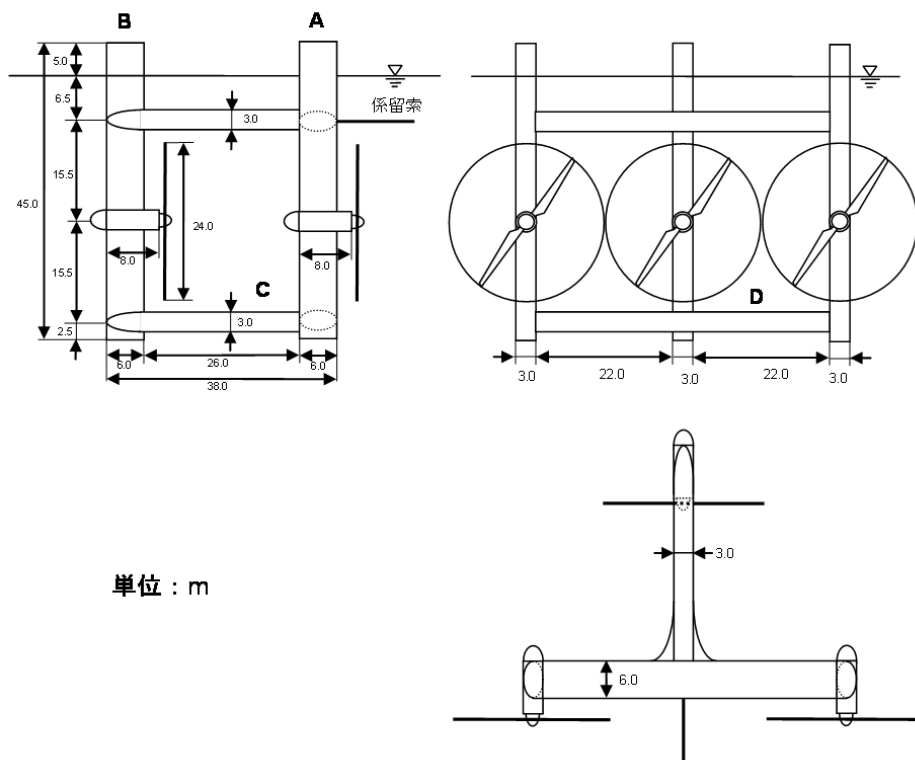


Fig.5-2 本研究室で提案している海流発電の図 2[1]

5.2 設置海域

海流発電用プラットフォームの設置海域として黒潮を検討している[1]。黒潮は、海流の中でも特に流速が速い西岸境界流のひとつであり、メキシコ湾流と併せて二大海流と呼ばれる。ほかにもブラジル海流やアガラス海流など流速の大きい海流は各地に存在し、黒潮における海流発電用プラットフォームは世界中に展開することが可能である。また、黒潮は幅 100km、深さ 500m、流速は速いところで 2m/s を超す膨大な流れであるから、エネルギー源としてのポテンシャルは非常に大きい。

海流発電に適した海域の条件を下に挙げる。

- ・ 平均流速が速い
- ・ 流速が安定している
- ・ 黒潮大蛇行の影響が小さい
- ・ 水深が大きくない(1000m より浅い)
- ・ 電力消費地が近い

5.3 自然環境条件

浮体式風車の検討に用いられる日本周辺の代表的自然環境条件[6]を参考に海流発電用プラットフォームの自然環境条件を設定した。浮体式風車の検討では定格、カットアウト、暴風の自然環境条件を Table.5-1 のように設定している。

自然環境条件は海流発電の稼働時 2 ケースと荒天時 1 ケースとした。設定した自然環境条件を以下に示す。

波浪中の挙動

- ・稼働時 振幅 1.5m、周期 7.0s
 振幅 3.9m、周期 10.7s
- ・荒天時 振幅 6m、周期 14s

Table.5-1 浮体式風車の自然環境条件[6]

条件	有義波高[m]	波周期[s]	風速[m/s]	潮流速[m/s]	備考
定格	3.9	7.4	14.0	1.85	最大水深 200m
カットアウト	7.1	9.8	25.0		
暴風	12.0	13.4	50.0		

5.4 海流発電用プラットフォームの周波数応答特性

提案している提案している海流発電用プラットフォームの周波数応答特性を調べるために、海流発電用プラットフォームを Fig.5-4 のように分割した場合のヒープ方向の周波数応答関数を描いた。海流発電用プラットフォームの正面方向と波の向きとがなす角 0° の場合と海流発電用プラットフォームの正面方向と波の向きとがなす角 90° の場合で計算した (Fig.5-5)。Fig.5-6 が角度 0° の場合の周波数応答関数で Fig.5-7 が角度 90° の場合の周波数応答曲線である。Fig.5-6、Fig.5-7 の両方のグラフとも、周波数 $0.16\sim 0.18[\text{rad/s}]$ 付近においてピークが見られる。これは海流発電用プラットフォームの固有周期と波の周期が重なり同調しているためだと考えられる。Table.5-2 は海流発電用プラットフォームの固有周期を計算したものである。固有周期は 37.9s で、周波数は 0.17rad/s となり、Fig.5-6、Fig.5-7 のピークと一致する。

また、Fig.5-6、Fig.5-7 の両方のグラフからは非線形性が確認できる。これは流体力をモリソン式ベースで評価しているためである。

周波数 0.25rad/s 付近で応答/振幅が小さくなっていることが確認できる。これは波無し周波数と呼ばれており、ヒープ方向の波強制力が小さくなっているためだと考えられる。

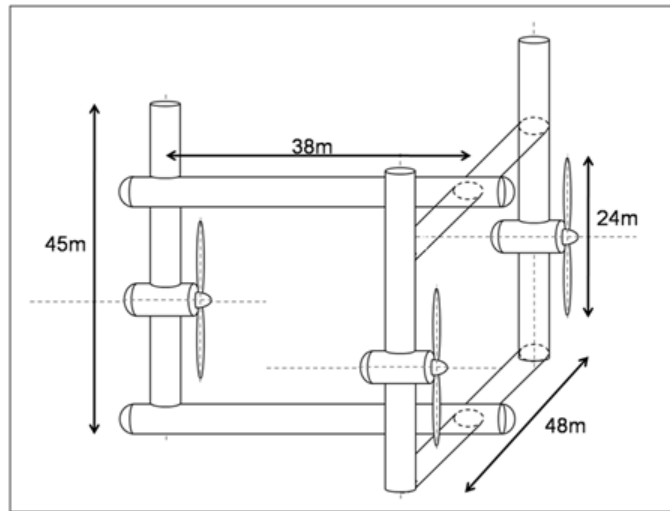


Fig.5-3 提案している海流発電用プラットフォーム

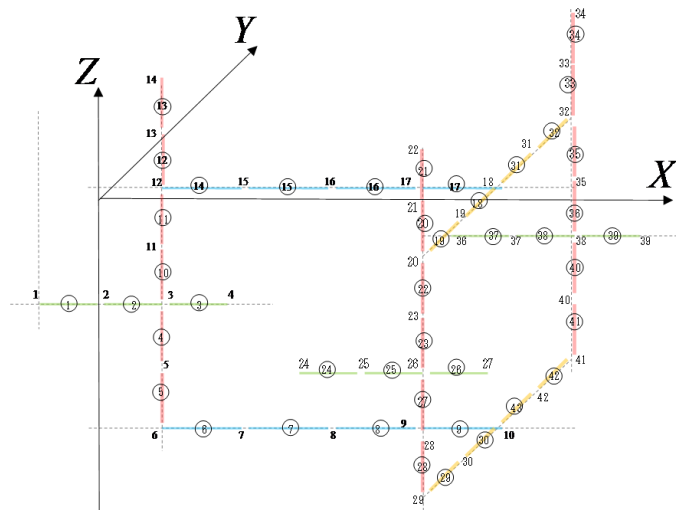


Fig.5-4 提案している海流発電用プラットフォームの要素分割図[2]

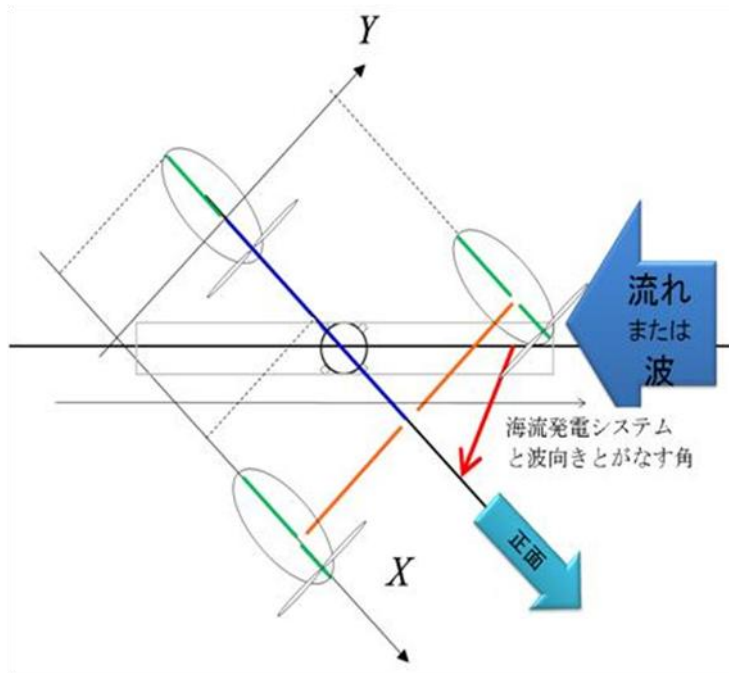


Fig.5-5 海流発電用プラットフォームと波向きとがなす角の定義

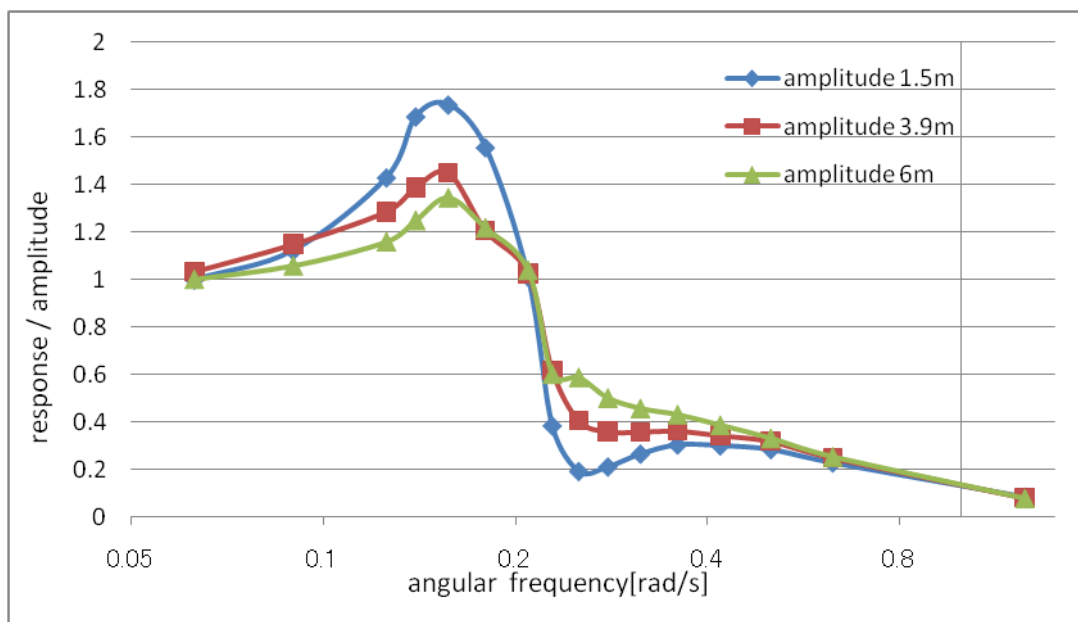


Fig.5-6 海流発電用プラットフォームの周波数応答関数 (角度 0°)

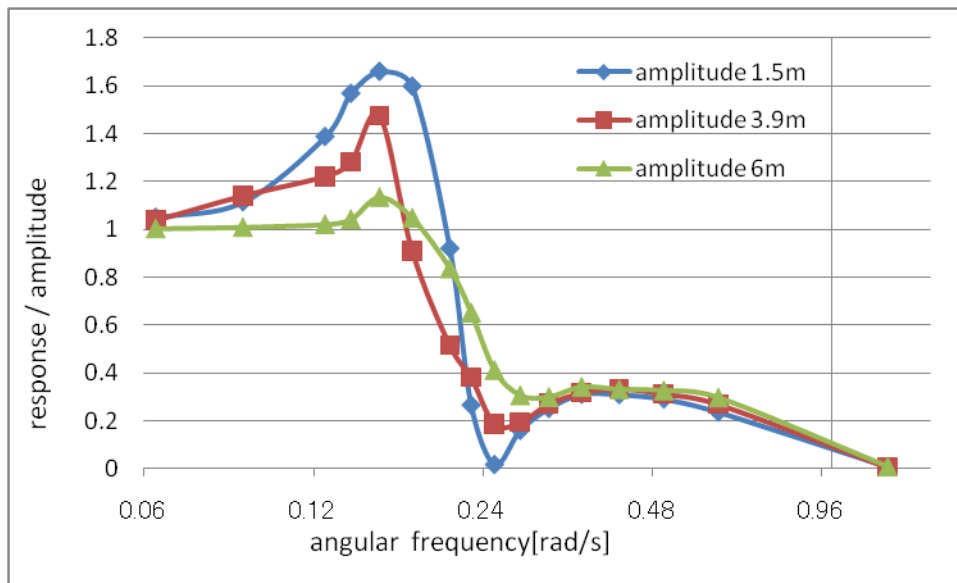


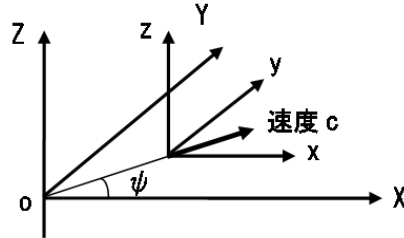
Fig.5-7 海流発電用プラットフォームの周波数応答関数（角度 90°）

Table 5-2 海流発電用プラットフォームの固有周期の計算

総質量[kg]	7576210.30		部材形状・断面形状			
内訳	構造質量[kg]	付加質量[kg]	長さ[m]	幅[m]	深さ[m]	本数
水平横部材	1360790.32	2721580.65	6	47	3	2
ナセル	521153.74	521153.74	8	3	3	3
水平長手方向部材	376388.81	376388.81	26	3	3	2
鉛直部材	1698754.23	0.00	6	3	45	3
復原ばね[N/m]	207816.84		6	3		3
固有周波数 [rad/s]	0.17					
固有周期[sec]	37.94					

5.5 波と流れの共存場における周波数応答特性

実際の海流は波だけではなく流れも存在する。波と流れの共存場での波ポテンシャル、粒子速度等は次のように表される。



全体座標系と流れ固定座標系の関係

$$X = x + c_x t$$

$$Y = y + c_y t$$

$$Z = z$$

ここに、 c = 流速、 $c_x = c \cos \psi$ 、 $c_y = c \sin \psi$ 。波ポテンシャルは

$$\begin{aligned} \phi &= \frac{ga}{\omega} e^{kz} \sin(k_x x + k_y y - \omega t) + c_x X + c_y Y \\ &= \frac{ga}{\omega} e^{kz} \sin(k_x (X - c_x t) + k_y (Y - c_y t) - \omega t) + c_x X + c_y Y \\ &= \frac{ga}{\omega} e^{kz} \sin(k_x X + k_y Y - (k_x c_x + k_y c_y + \omega)t) + c_x X + c_y Y \end{aligned}$$

波粒子速度

$$u = \frac{\partial \phi}{\partial X} = a\omega \cos \theta e^{kz} \cos(k_x X + k_y Y - (k_x c_x + k_y c_y + \omega)t) + c_x$$

$$v = \frac{\partial \phi}{\partial Y} = a\omega \sin \theta e^{kz} \cos(k_x X + k_y Y - (k_x c_x + k_y c_y + \omega)t) + c_y$$

$$w = \frac{\partial \phi}{\partial Z} = a\omega e^{kz} \sin(k_x X + k_y Y - (k_x c_x + k_y c_y + \omega)t)$$

a = 波振幅

ω = 波周波数 ($= 2\pi/T$)

k = 波周波数 ($= 2\pi/\lambda$)

ρ = 流体密度

波と流れの共存場での海流発電用プラットフォームのヒープ方向の周波数応答特性を調べた。波と流れの向きが同方向の場合と波と流れの向きが逆方向の場合の 2 ケースについて検討する。流れの流速は 2.0m/s とした。

波振幅 3.9m、6m においては海流発電用プラットフォームの動揺が大きくなりすぎて、プログラム上で応答の計算が発散してしまったため、波振幅 1.5m の場合の周波数応答関数のみ描く。

Fig.5-8 は波向きと流れの向きが同方向の場合の周波数応答関数であり、Fig.5-9 は波向きと流れの向きが逆方向の場合の周波数応答関数である。波向きと流れの向きが同方向の場合と逆方向の場合とも同様の特性が見られる。

また Fig.5-10 は振幅 1.5m の時の波のみが来た時の周波数応答と波と流れ(波と流れの向き同方向)が来た時の周波数応答を描いたものである。波と流れが来た時の応答/振幅の方が波だけが来た時の応答/振幅より約 1.5 倍大きい値である。

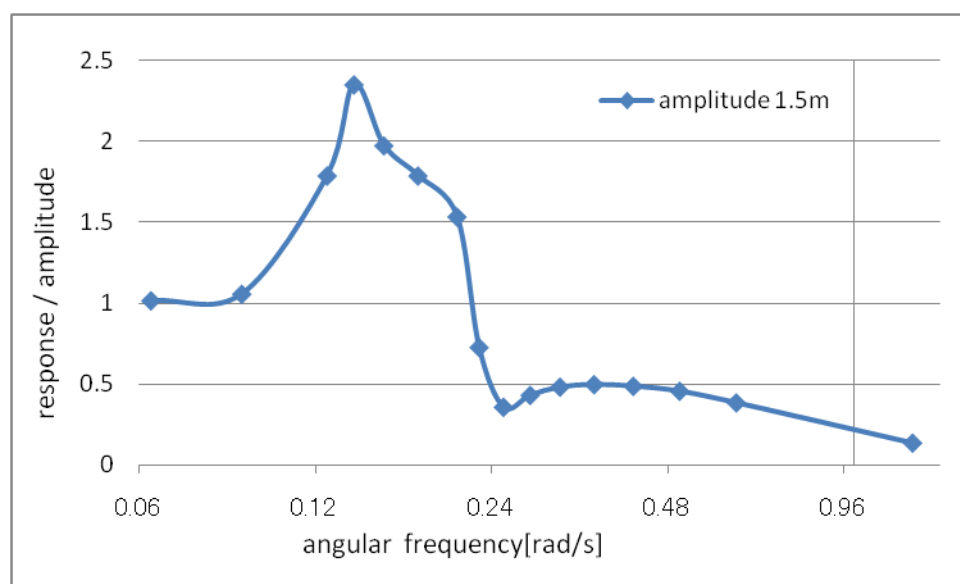


Fig.5-8 波と流れの共存場での周波数応答関数(波と流れは同方向)

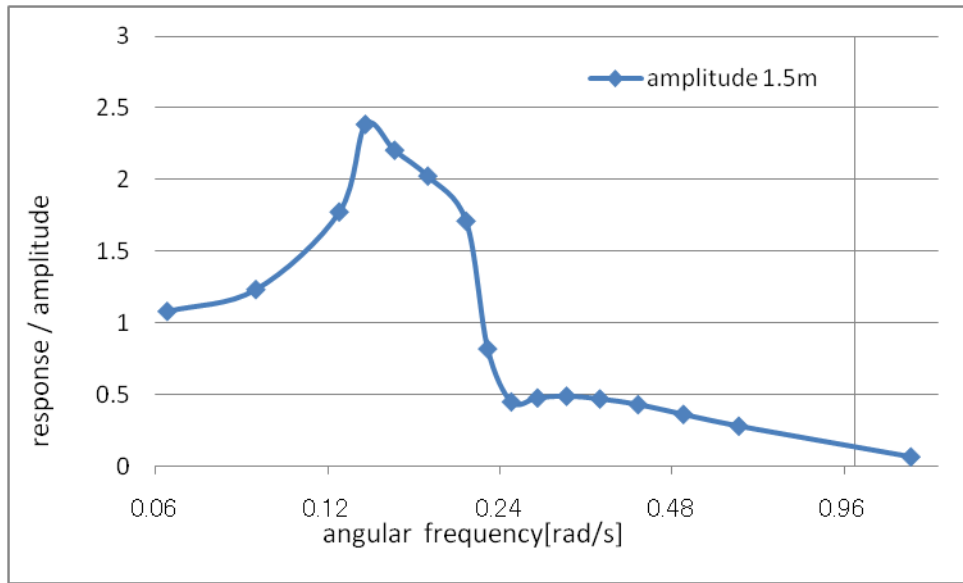


Fig.5-9 波と流れの共存場での周波数応答関数(波と流れは逆方向)

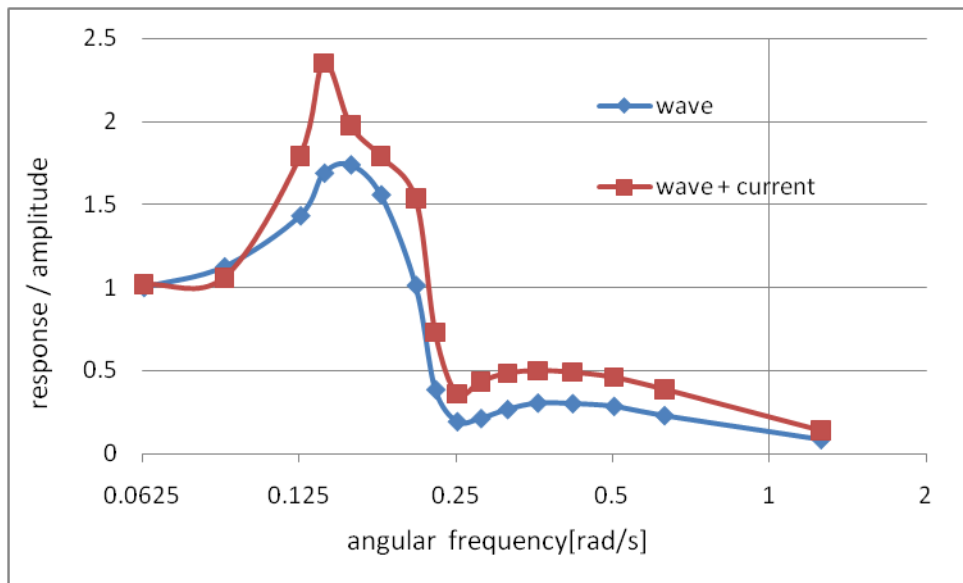


Fig.5-10 波のみの周波数応答と波と流れ(波と流れの向き同方向)の周波数応答

5.6 海流発電用プラットフォームの応力特性

作成した海流発電用プラットフォームの動的応答解析プログラムを使用して提案している海流発電用プラットフォームの各部にかかる応力を計算した。構造的に厳しくなるであろう Fig.5-4 における節点番号 6、10、12、18、20、29 について応力の計算を行った。その中で一番応力の値が大きい節点番号 18 の Y 軸回りの曲げ応力の周波数曲線を描いた。それが Fig.5-11 である。すべての波振幅で周波数 0.9rad/s と 0.17rad/s においてピークが確認できる。周波数 0.17rad/s のピークは同調のためだと考えられる。

また、Fig.5-12 に振幅 3.9m、周波数 0.17rad/s の波が来た時の節点番号 12 と節点番号 18 のヒープ方向の変位の Y 軸回りの曲げ応力の時系列変化を示す。節点番号 18 のヒープ方向の変位が最大(7m)の時に曲げ応力の絶対値も最大(30kgf/mm²)になっている。この時、節点番号は海面から出ている状態であり、浮力が無くなり重力が大きくなり、応力が大きくなっている可能性がある。

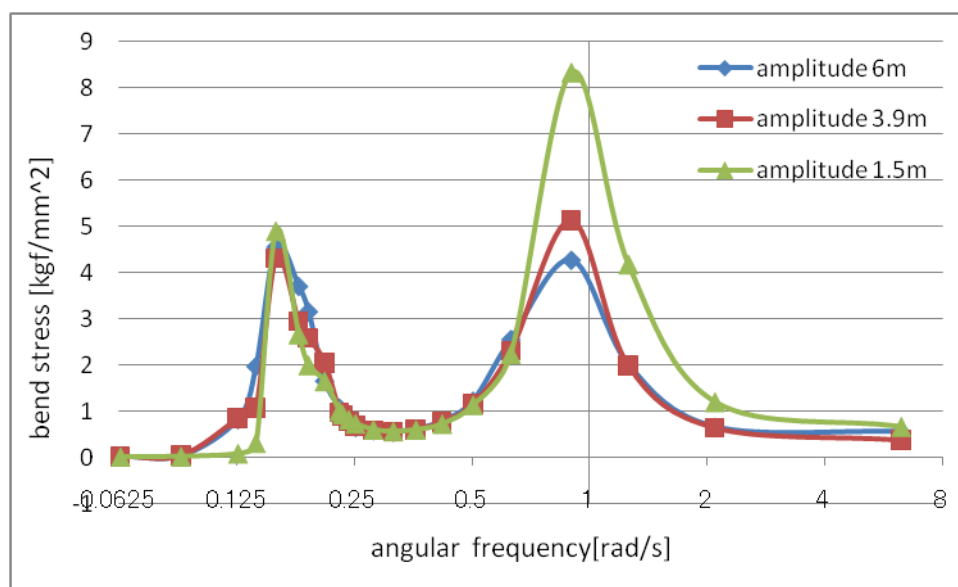


Fig.5-11 海流発電用プラットフォームの周波数と応力の関係

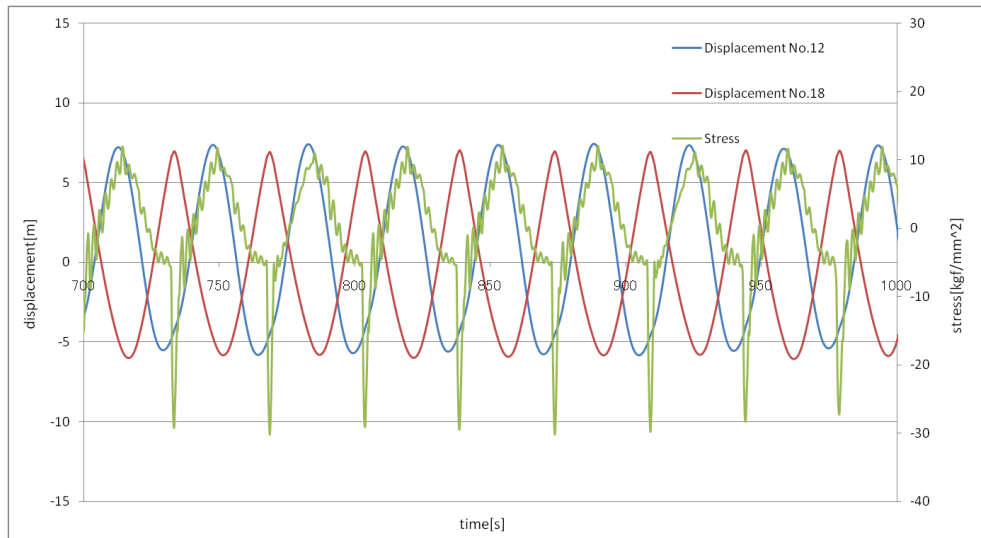


Fig.5-12 節点番号 18 の同調時の変位と応力の時系列変化

5.7 考察

提案している海流発電用プラットフォームの技術的成立性について考察する。Fig.5-13 は波振幅 1.5m、3.9m、6m の時の波の周波数と節点番号 18 の Y 軸回りの応力の関係である。節点番号 18 の Y 軸回りの応力がプラットフォームにかかる一番大きな応力である。

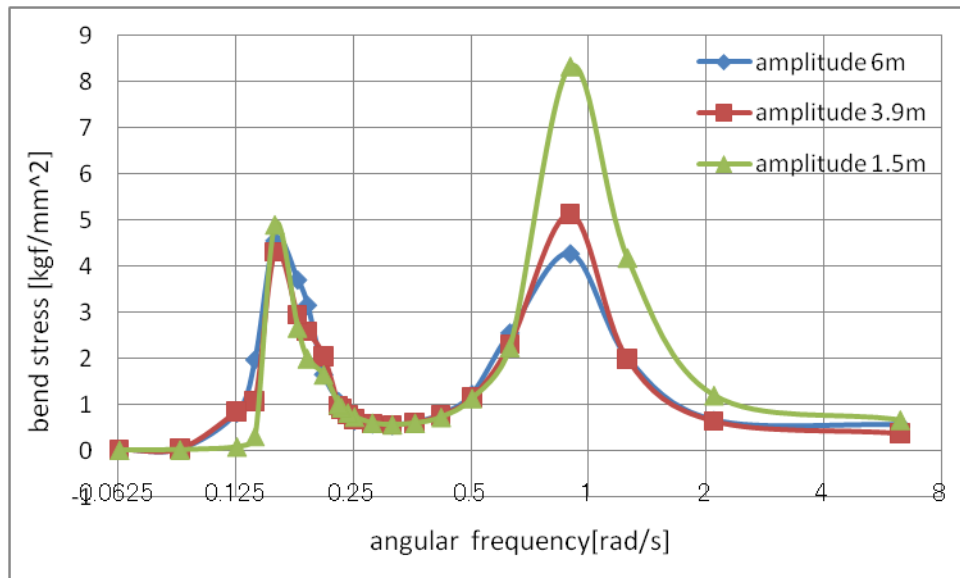


Fig.5-13 周波数と応力の関係

ここで、海流発電の自然環境条件は以下である。

- ・稼働時 振幅 1.5m、周期 7.0s
振幅 3.9m、周期 10.7s
- ・荒天時 振幅 6m、周期 14s

Fig.5-13 から、

- ・振幅 1.5m、周期 7s の波の時の海流発電用プラットフォームにかかる最大応力は
 $8.3(\text{応力/振幅}) \times 1.5(\text{振幅}) = 12.45[\text{kgf/mm}^2]$
- ・振幅 3.9m、周期 10.7s の波の時の海流発電用プラットフォームにかかる最大応力は
 $2(\text{応力/振幅}) \times 3.9(\text{振幅}) = 7.8[\text{kgf/mm}^2]$
- ・振幅 6m、周期 14s の波の時の海流発電用プラットフォームにかかる最大応力は
 $0.8(\text{応力/振幅}) \times 6(\text{振幅}) = 4.8[\text{kgf/mm}^2]$

となる。

鋼鉄の降伏応力は約 $24[\text{kgf/mm}^2]$ であり、安全率 1.5 とすると許容応力は $16[\text{kgf/mm}^2]$ である。これは上記の稼働時、荒天時の 3 ケースの最大応力より大きい。よって、提案している海流発電用プラットフォームは波のみが来た場合については、構造的に成り立つと考えられる。しかし、実際に設置する海域は波と流れの両方がある。よって、波と流れの共存場での海流発電用プラットフォームの技術的成立性についても検討する必要がある。

6. 結論

海流発電用プラットフォームの時間領域の動的応答解析プログラムを作成した。

プログラムは骨組構造物の節点数、要素数、節点座標、接続情報、材料情報、計算条件、流体の波高、角速度を入力すると各節点の時刻歴の変位と各要素の応力が得られる。このプログラムを使用して、提案している海流発電用プラットフォームの技術的成立性について考察した結果、波のみが来た場合においては、技術的に成立することを確認できた。波と流れの共存場での技術的成立性については一応の検討結果を得たが、より詳細な検討が必要である。

以下は作成したプログラムの概要である。

プログラムの概要

楕円柱により構成された浮体構造物の動揺・構造応答解析プログラムである。細い部材で構成されていることに加え、楕円柱であることから、揚力の発生を考慮した拡張モリソン式を開発して用いている。また、流体力評価が非線形であることから、解法はニューマーク β 法を用いた時間領域時刻歴応答である。

[荷重の評価]

波力の取り扱い 部材直交方向：拡張モリソン式

部材軸方向：効力（部材表面に作用）、部材端部水圧

重力、浮力を考慮する。

荷重はすべて分布荷重として取り扱う。

[座標系]

全体座標系は水面に座標原点を持ち、 Z 軸方向を鉛直方向とする座標系とする。部材座標系は Z 軸方向を部材軸とし、 X 軸方向を部材長径方向、 Y 軸方向を部材短径方向とする。

[拡張モリソン式]

楕円柱に作用する流体力評価式を拡張モリソン式として定式化。

楕円柱に作用する単位長さ当たりの流体力 = 付加質量 + 質量力 + 抗力 + 揚力

[運動方程式の解法]

ニューマーク β 法による運動方程式の時間積分

慣性行列、剛性行列、波力から運動方程式を求めることができる。

[レーレー減衰の利用と時間刻み]

前の時刻の状態量を用いて右辺の外力を求め、これを用いて運動方程式を解いて、次の時刻の状態量を求めている。厳密には平衡状態には達していないので、計算結果が緩やかに発散する可能性がある、これを防止するために、レーレー減衰を用いて計算を安定させている

7. 今後の課題

今後の課題は、波と流れの共存場での技術的成立性についての検討である。

実際の海流は波だけではなく流れも存在する。本研究では波のみが来た場合の技術的成立性の検討を行ったが、波と流れの共存場での技術的成立性について検討する必要がある。

8. 参考文献

- [1] 鈴木英之(東大)、早稲田卓爾(東大)、大内一之(大内海洋コンサルタント) ”黒潮による海流発電システムの基礎的検討“, 日本船舶海洋工学会 海洋工学研究会-海洋環境研究会合同部会, 2008年4月2日
- [2] 山地宏典, ”海流発電システムの動的挙動解析法の開発“, 2009年
- [3] Günther Clauss, Lehmann, Carsten Östergaard Eike. (1992). Offshore Structures.
- [4] 吉田 宏一郎. (1991). 海洋工学の基礎知識
- [5] 藤谷 義信. (1993). パソコンで解く骨組の力学. 丸善
- [6] 鈴木宏始, 山口弘志, 神田雅光, 今北明彦, 石原孟, 助川博之, 宮川昌宏 : ”洋上風力発電用 TLP 型浮体の初期設計“, 第 21 回海洋工学シンポジウム, OES21-146, 2009年8月6,7日
- [7] 西 亮. (1984). 海流発電の技術的可能性.
- [8] 池田 芳郎. (1977). 等角写像とその方法.
- [9] 湯浅亀一. (1960). 材料力学公式集.
- [10] 望月 重・小林 浩. (1976). 海洋建築物の設計と実際.
- [11] Abacus Controls. (2002). Ocean Current Power Generator.
- [12] Driscoll R. Frederick. (2008). An Overview of Ocean Energy and the COET.
- [13] Fraenkel Peter. (2008). The deployment of marine devices and connection to the grid.
- [14] Frankel Peter. (2003). The "Seaflow" project: Pioneering the development of tidal stream turbines.
- [15] Ainsworth David, Thake Jeremy. (2006). Final Report on Preliminary Works Associated with 1MW Tidal Turbine.
- [16] Chakrabarti K. Subrata. (2005). Handbook of offshore engineering.
- [17] IPCC. (2007). IPCC 第4次評価報告書 政策決定者向け要約.
- [18] Marine Current Turbines. (2008). Marine Current Turbines.
参照先: <http://www.marineturbines.com/>
- [19] ORPC. (2008). Ocean Renewable Power Company.
参照先: <http://www.oceanrenewablepower.com/home.htm>
- [20] United States Army. (1943). Ocean Currents and Sea Ice from Atlas of World Maps.
- [21] 環境省. (2008). 環境白書・循環型社会白書.
- [22] 広島大学工学部. (2008). 広島大学工学部第4類. 参照先: <http://eng4.hiroshima-u.ac.jp/global/graduate/laboratory-ves4.html>

謝辞

本研究を行うにあたって多くの方々の助言や支えがあり、そのおかげでこのような形にまとめあげることができました。

本研究の指導教官である鈴木英之先生には、この研究室に入ってから 2 年間、本当にお世話になりました。全く異なる専攻から入学し、専門的な知識がなかった私に基礎的なことでも以前聞いたことでも、いやな顔一つせずに丁寧に説明してくださり、とても有難かったです。就職や研究のことで色々とお世話になっていただき感謝しています。本当にありがとうございました。

本研究では副査を担当していただいた高木健先生も、1 年間いろいろとお世話になりました。先生とは出会ってから 1 年間しか経っていませんが、とても親しみやすく、なによりも先生と一緒した飲み会が楽しかったです。本当にありがとうございました。

早稲田卓爾先生にも、大学院に入学時からいろいろとお世話になりました。全く専攻の専門知識がない私に優しく、わかりやすく授業をしていただき感謝しています。先生の一番の印象はうれしそうにお酒を飲む素敵な姿です。本当にありがとうございました。

鈴木研究室技術専門員の榎本一夫様には、本研究の全ての実験についてサポートしていただきました。実験が夜遅くまでかかってしまったこともあったにもかかわらず、最後までご面倒を見ていただき感謝しています。本当にありがとうございました。

鈴木先生の秘書の小田野由香様には、あらゆる事務的な手続きを手伝っていただきました。ありがとうございました。

同室の研究室での博士課程の清松啓司さんには、研究から雑務まで全ての面で研究室を支えて頂きました。入学した当初、研究室の勝手がわからなかった私に、何事にも親切に教えていただき本当に感謝しています。清松さんの研究に向かう姿勢には非常に大きな刺激を受けました。ありがとうございました。

共同研究として約 1 年間一緒に研究をしてきた廣川琢士さんにも大変お世話になりました。お互いプログラミングが苦手ながらも、がんばってこれたのは廣川さんのおかげだと思っています。実験期間の雑談が何よりも楽しかったです。本当にありがとうございました。

鈴木研の留学生の李洋君には、面白い話で楽しませてもらい、研究の励みになりました。私の最も親しい中国人で、最も親しい外国人です。本当にありがとうございました。

研究室の同期である、北原悠君、菊田晋介君、尾崎賢司君、陳棟君、西田智哉君、平松君にも大変お世話になりました。みなさんには研究のアドバイスをいただいて助けられたり、一緒にご飯を食べたりとたくさん思い出があります。みなさんと同じ研究室で同期としてやってこれて本当に良かったです。ありがとうございました。

研究室の1期下の岡山真也君、高辺圭介君、野澤俊樹君、小平翼君、塩沢君、新地政人君、高橋俊介君にも大変お世話になりました。研究に対するモチベーションの高さやエネルギーギッシュな雰囲気非常に大きな刺激を与えてくれました。ありがとうございました。

研究室2期下で卒論生の宝谷君、松田君にも大変お世話になりました。二人には非常に大きな刺激を与えてくれて感謝しています。ありがとうございました。

最後に、大学院卒業まで教育を受けさせてくれた両親に、最大の感謝を表したいと思います。ありがとうございました。