

浮体式洋上風力発電への適用に向けた 船舶・海洋構造物動揺解析システム MARIS の改良

坂本大樹ⁱ, 眞鍋尚ⁱⁱ

The Application of Code MARIS to Floating Offshore Wind Farm

Daiki SAKAMOTO, Takashi MANABE

近年、脱炭素化社会の実現に向けて浮体式洋上風力発電の開発が進められてきており、浮体に関するシミュレーション技術にも注目が高まっている。本稿では、当部のソリューションである「船舶・海洋構造物動揺解析システム MIZUHO MARIS-II」について、より洋上風力発電分野における汎用的なシミュレーションを行うためにコード改良を行った事例について紹介する。

(キーワード): 浮体式洋上風力発電, 動揺解析, OpenFAST, 複数浮体, 弾性変形

1 はじめに

近年、脱炭素化社会の実現に向けて洋上風力発電導入の機運が高まっている。直近の状況だと、いわゆる「第2ラウンド」と呼ばれる、「秋田県八峰町、能代市沖」、「秋田県男鹿市、潟上市、秋田市沖」、「新潟県村上市、胎内市沖」、「長崎県西海市江島沖」の4海域に対して2022年12月から事業者の公募がなされており、2023年6月に締め切りを迎えた。本公募には4海域併せて20社前後の事業者が応札しており、国による審査や第三者委員会による評価などを経て、2024年3月までに各海域の事業者が選定される予定である。一方で、上記は基本的に着床式洋上風力発電に関するものであるが、遠浅な海岸が少ない我が国においては、浮体式の方が、発電ポテンシャルがあるとされ、実証化に向け研究開発が進められている。過去の例として福島浮体式洋上ウインドファーム実証研究事業¹⁾がある他、2023年10月には実証事業の候補区域として4区域が選定されている。

このような洋上風力分野、特に浮体式洋上風力発電に関して、当社（以下MHRTと記載）でもこれまで培った浮体動揺解析技術を活かして貢献したいと考えており、過去の投稿では浮体式洋上風力発電の設計に関連する数値シミュレーション技術を整理し

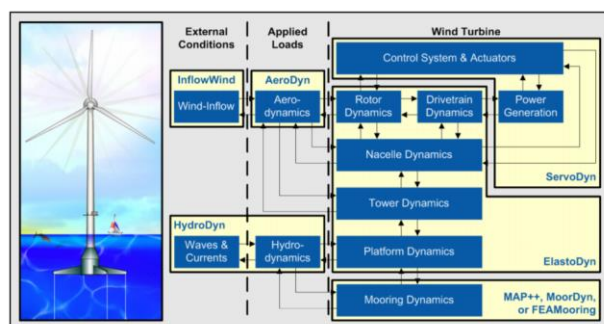


図1 OpenFAST 概要図⁴⁾

たうえで、関連のあるMHRTの取り組みについて整理した²⁾。MHRTではその後も継続的に技術開発に取り組んでおり、本稿ではMHRTが所有する「船舶・海洋構造物動揺解析システム MIZUHO MARIS-II³⁾（以下MARISと記載）」と公開ソフトウェアであるOpenFAST⁴⁾をカップリングした事例や、洋上風力分野への適応に向けたMARISのモデル改良として、複数浮体解析機能や弾性変形解析機能の実装を行っており、それらの事例を紹介する。

2 OpenFAST とのカップリング

2.1 OpenFAST について

ⁱ サイエンスソリューション部 先進技術システムチーム 主任コンサルタント

ⁱⁱ サイエンスソリューション部 先進技術システムチーム 次長 博士（工学）

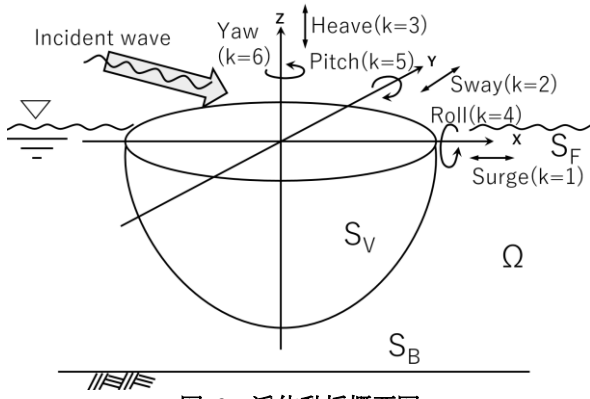


図3 浮体動揺概要図

これらを満たす Green 関数 $G(P, Q)$ を定義し、境界条件の下で解くことで diffraction ポテンシャル、radiation ポテンシャルが求まり、そこから流体力波力が算出される。詳細は眞鍋⁵⁾を参照されたい。なお Green 関数 $G(P, Q)$ は、 P, Q の座標の他に水深 h 、波数 k 、波周波数に依存する関数であり、MARIS では、級数形と積分形の 2 種類を使い分けている。それぞれの Green 関数を式(4)、(5)に示す。

・級数形 Green 関数

$$G(P, Q) = \frac{2\pi(v^2 - h^2)}{k^2h - v^2h + v} \cosh[k(\xi + h)] \cdot [Y_0(kR) - iJ_0(kR)] + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(k_n^2 + v^2)}{k_n^2h - v^2h + v} \cos[k_n(z + h)] \cos[k_n(z + h)] \cdot K_0(k_n R) \quad (4)$$

・積分形 Green 関数

$$G(P, Q) = \frac{1}{R} + \frac{1}{R'} + 2P \cdot V. \int_0^{\infty} \frac{(\mu + v)e^{-\mu k} \cosh[\mu(\xi + h)] \cosh[\mu(z + h)]}{(\mu \sinh \mu k - v \cosh \mu k)} \cdot [J_0(\mu R)] d\mu + 2\pi \int_0^{\infty} \frac{(k^2 - v^2) \cosh[k(\xi + h)] \cosh[k(z + h)]}{k^2h - v^2h + v} \cdot [J_0(k)] d\mu \quad (5)$$

ここで $P \cdot V$ は主値積分を表し、 k_n : n 次の波数、 J_0 : 0 次の J-Bessel 関数、 Y_0 : 0 次の y-Bessel 関数、 K_0 : 0 次の変形 Bessel 関数である。

一方 OpenFAST でも、流体力の算定方法としてポテンシャル理論を選択できるが、OpenFAST 自体にはポテンシャル理論に基づく流体力波力の算定機能はなく、同理論を選択する場合は、別のソフトウェアで計算された流体力波力を与える必要がある。流体力波力を算定するソフトウェアは複数あるが、OpenFAST では WAMIT 社が開発したソフトウェアである WAMIT⁶⁾を想定しており、OpenFAST でも WAMIT の出力ファイルをそのまま読み込めるよう

になっている。一方 WAMIT は有償のソフトウェアであり、別のソフトウェアで計算した流体力波力を WAMIT の出力ファイルにそろえることで、OpenFAST へ与えることができる。なお WAMIT でも流体力波力の算出には 3 次元特異点分布法が用いられており、グリーン関数の設定パラメータに差異はあるが概ね MARIS と同じ手法である。

2.3 風外力の算定方法

次に風外力の算定方法についてであるが、MARIS の場合は、計算条件として、高度 10m における平均風速 V_{10} 、外力が働く位置、受風面積 A 、風力係数 C_D を与え、式(6)から求めた力が指定した位置に働くものとして計算される。

$$F_a = \frac{1}{2} \rho_a C_D A V_{10}^2 \quad (6)$$

ここで ρ_a は空気密度である。なお、10m 風速 V_{10} から外力が働く高さ z の風速 V への換算は、式(7)に示すいわゆるべき乗則によって求められ、乗数 α を入力として指定することとなる。

$$V = V_{10} \left(\frac{z}{10} \right)^{\alpha} \quad (7)$$

また不規則風は、パワースペクトルを日野の式、Davenport の式から選択し、算出する。日野の式、Davenport の式をそれぞれ式(8)、(9)に示す。

$$S_{(\omega)} = 0.238 \frac{\bar{V}^2}{\beta} \left[1 + \left(\frac{\omega}{\beta} \right) \right]^2 \beta = 1.169 \times 10^{-3} \frac{V_{10}^{\alpha}}{\sqrt{K}} \left(\frac{z}{10} \right)^{2m\alpha-1} \quad (8)$$

$$\bar{V}^2 = 6KV_{10} \omega S_{(\omega)} = 4KV_{10}^2 \frac{X^2}{(1 + X^2)^{4/3}} X = 1200 \frac{\omega}{V_{10}} \quad (9)$$

ここで、 K は表面摩擦係数(=0.003)、 m は大気安定度である。

一方 OpenFAST では、AeroDyn によって各ブレード、ナセル、タワーに働く外力が求められ、各ブレードに働く外力は翼素・運動量理論(BEM 法)などによって求められる。加えて、風外力の計算と同時に ServoDyn によって風車の制御計算も行われている。また風データについては、MARIS と異なり平面場を与える必要があり、OpenFAST に付属している TurbSim を用いて作成することができる。TurbSim では平均風速の他、乱流タイプなどを入力ファイルとして設定し 2 次元風速場の時系列データを作成できる。

2.4 カップリングについて

MARIS は汎用的な浮体動揺解析プログラムであるため、風車の解析機能はなく、風車が受ける風外力は2.3で記載のとおり受風面積と抵抗係数を与えて計算するのみである。そこで OpenFAST とカップリングを行うことで、風車の風外力算定および風車制御も含めた浮体動揺計算を行うことが可能となる。カップリングの方法としては流体力波力の算出までを MARIS で行う手法①と MARIS での風応力算定機能の代わりに OpenFAST の風外力算定機能および風車制御機能を用いる手法②の 2 通りを検討した。各手法のカップリング概要を図 4 に示す。

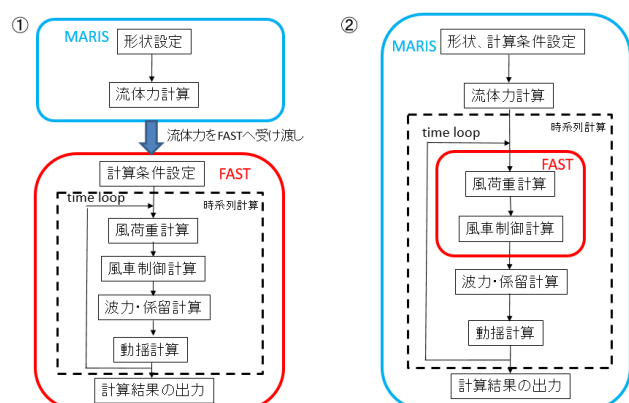


図 4 カップリングフロー図

3 検証

2 章で記載した流体力および風外力算定機能および OpenFAST とのカップリング効果について比較、検証を行うための計算を行った。



図 5 IEA-5MW-Barge 型浮体 概要図⁷⁾

3.1 解析対象

今回は国際的なベンチマークとして知られる IEA-

5MW-Barge 型浮体⁷⁾を対象とした。風車および浮体の概要図を図 5 に示す。また主なパラメータを表 1 に示すとともに次節以降の主な解析条件についても表 2 に示す。なお係留索張力の解法は、大きく分けると、係留索を複数の要素に分解し、運動方程式を解く動的解法と、時系列計算における各時刻にて係留索特性曲線を参照する準静的解法に分けられる。本論では準静的解法を採用しており、また係留索の初期張力は 0 としている。

表 1 主な浮体、風車条件

名称	設定値	名称	設定値
浮体形状(W×L×H)	40 m×40 m×10 m	発電規模	5MW
ムーンプール形状(W×L×H)	10 m×10 m×10 m	形状	Upwind型
喫水	4 m	ブレード枚数	3枚
排水体積	6,000 m ³	ローター直径	126m
重量	5,452,000 kg	ハブ高さ	90 m
CM	0.281768 m	カットイン風速	3 m/s
慣性モーメントRoll	726,900,000 kg・m ²	カットアウト風速	25 m/s
慣性モーメントPitch	726,900,000 kg・m ²	ローター重量	110,000 kg
慣性モーメントYaw	1,453,900,000 kg・m ²	ナセル重量	240,000 kg
水深	150 m	タワー重量	347,460 kg

表 2 主な計算条件

分類	パラメータ	設定値	分類	パラメータ	設定値
波	有義波高	1 m	係留索	本数	6本
	有義波周期	8 s		EA	5.89×10^6 N
	スペクトル	JONSWAP	その他	計算時間	600 s
	波向	0 degree		時間刻み	0.0125 s
風(MARIS)	平均風速	12 m/s	風(OpenFAST)	乱流区分	C
	スペクトル	日野			
	平均風速	12 m/s			

3.2 流体力波力の比較

流体力波力の算定に関して、MARIS における計算結果と OpenFAST のサンプル例題において入力ファイルとして与えられている WAMIT での計算結果との比較を行った。解析は波周期 2~60 秒までの波に対して行った。MARIS で作成した浮体形状を図 6 に示す。なお WAMIT での流体力波力の算出の際には、ムーンプール部分にフタをした形状に対して計算を行っており、MARIS での計算の際にも同様の処理を行っている。

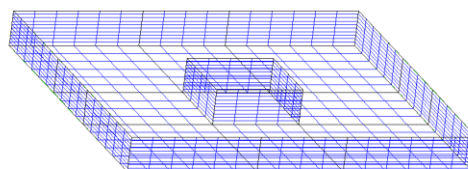


図 6 バージ型浮体メッシュ分割図

流体力について、MARIS の結果と WAMIT の結果を比較した図を図 7 に示す。Heave 方向および Roll 方向の高周波帯において差がみられるものの、MAIRS と WAMIT で概ね同等の結果が出ていることが確認できる。なお Surge 方向や Yaw 方向といった平面的な方向の流体力と比較すると、Heave 方向および Roll 方向といった鉛直方向の動揺が絡む流体力の方が、MARIS と WAMIT の差が大きくなるが、ポテンシャル理論における水深にともなうグリーン関数の評価に違いがあると考えられる。なお WAMIT では細かい計算条件は不明であるが、MARIS ではポテンシャル場に応じて級数形と積分形の 2 種類の Green 関数を使い分けている。

また、Surge 方向から波を与えた際の波強制力を図 8 に示す。Pitch 方向について、MARIS の方が、ピーク値が大きくなるものの、MAIRS と WAMIT で概ね同等の結果が出ていることが確認できる。

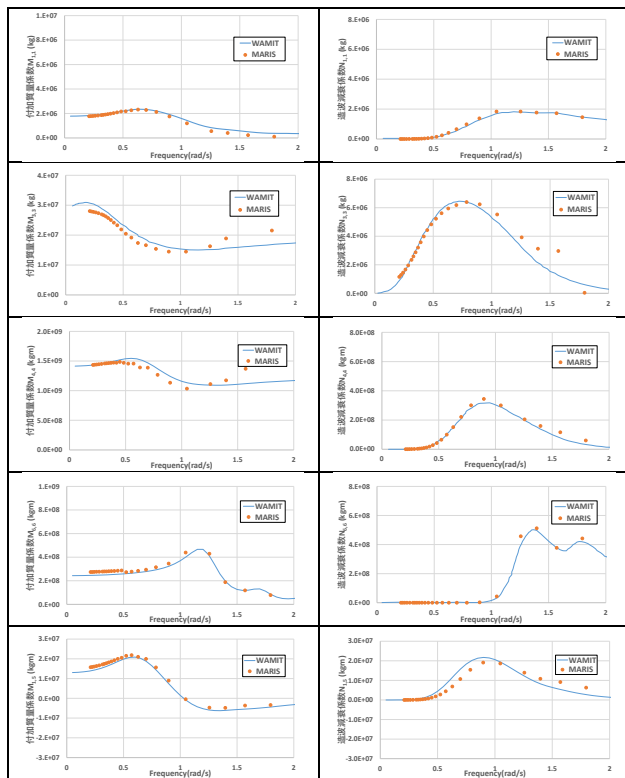


図 7 MARIS と FAST 流体力の比較
※オレンジ点が MARIS の結果を示す。

3.3 風外力算定機能の比較

2.3 に記載したとおり、従来の MARIS と OpenFAST では風応力算出の方法が異なる。ここではそれぞれで風外力を算出し、その比較を行った。計算条件は表 2 のとおりとした。

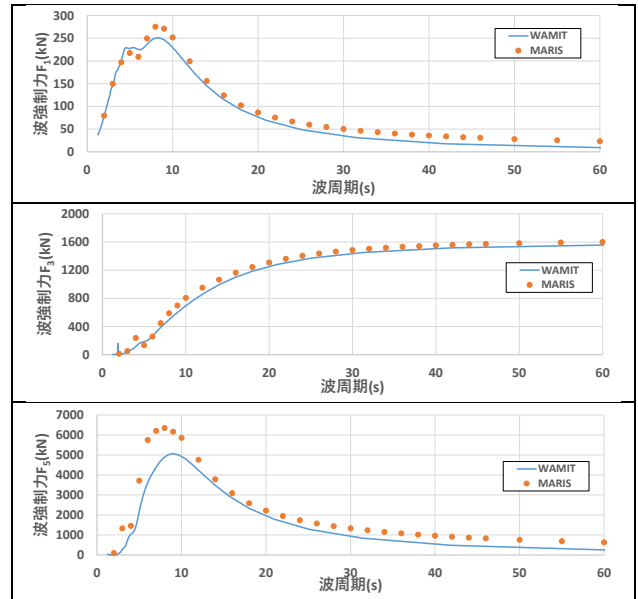


図 8 MARIS と FAST 波力の比較
※オレンジ点が MARIS の結果を示す。

従来の MARIS および OpenFAST で算出した風速および風外力の結果を図 9 に示す。なお OpenFAST の結果は、各ブレードにかかる外力の合計値を示している。風速については、2.3 で示したとおり MARIS と OpenFAST で算出する方法が異なるため、時系列としては一致しないが、設定した平均風速 12m/s を中心として、それぞれ不規則風が算出できていることが分かる。また風向きと垂直方向である Surge 方向の風外力については、概ね同程度の平均外力がかかっていることが分かるが、2.3 で記載したとおり、MARIS では風力係数を一定値で与えているのに対して、FAST では BEM 法に基づき各ブレードごとに仰角から風外力が求められている。また、従来の MARIS では風車の制御は考慮できていない一方で、OpenFAST では、風車の制御を含めた結果となっている。

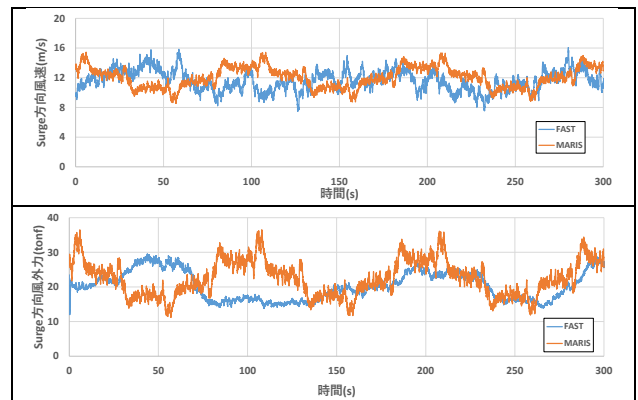


図 9 MARIS と FAST 風外力の比較

3.4 時系列計算の検証

ここでは MARIS と OpenFAST による計算結果の違いおよび 2 章で示したカップリング手法による効果の検証を行うための計算を行った結果を示す。

3.4.1 波力による時系列計算について

従来の MARIS と OpenFAST において、波力を受けた際の浮体動揺量計算結果の比較を行うため、それぞれ波力のみを与えた場合の計算を行った。それぞれの波高の時系列図を図 10 に、有義波高と各方向の最大動揺量を表 3 に示す。不規則波は、両者ともに JONSWAP のスペクトル関数で不規則波（有義波高 1m, 有義波周期 8 秒）を作成しており、用いる乱数の違いにより時系列としては一致しないが、概ね同程度の有義波高が外力として与えられていることが分かる。なお有義波高はそれぞれ波高の時系列データの標準偏差を 4 倍することで求めている。また最大係留索張力の結果を図 11 に示す。

最大動揺量については、Surge 方向について MARIS のほうが過大になる傾向があるものの、6 方向について、概ね同規模の動揺が確認できる。一方最大係留索張力については、各係留索単位で見ると差があるものもあるが、全体としての最大係留索張力は同程度の結果となることが確認できる。

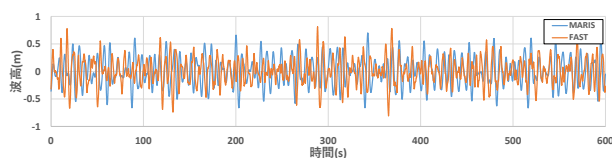


図 10 MARIS と FAST 波高の比較

表 3 有義波高及び最大動揺量比較

	MARIS	FAST
有義波高(m)	1.018	0.940
Surge方向最大動揺量(m)	0.946	0.630
Sway方向最大動揺量(m)	0.000	0.002
Heave方向最大動揺量(m)	0.259	0.269
Roll方向最大動揺量(deg)	0.002	0.007
Pitch方向最大動揺量(deg)	1.477	1.375
Yaw方向最大動揺量(deg)	0.014	0.068

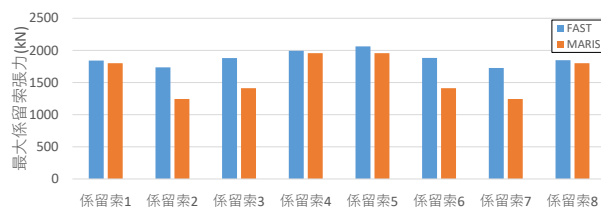


図 11 MARIS と FAST 最大係留索張力結果の比較

3.4.2 手法①について

カップリング手法①の検証として、全てを OpenFAST で行った計算結果と、MARIS で流体力算定を行った結果を OpenFAST に渡し、その後の時系列計算を行った結果との比較を行った。本ケースでは外力として風外力と波外力を設定し、風車の制御機能も考慮している。6 方向自由度の計算結果を図 12 に示す。各方向について概ね同様の結果が出ていることが分かる。

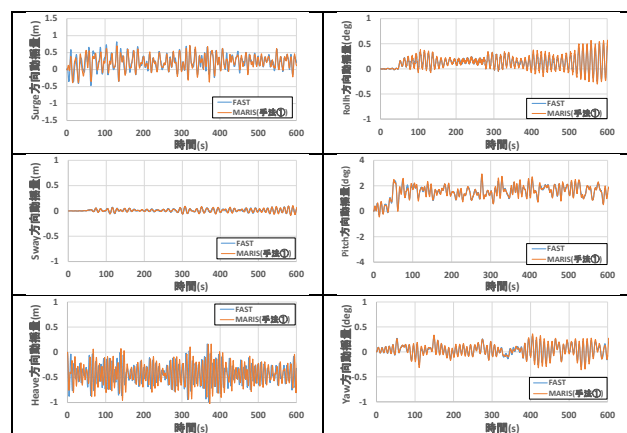


図 12 浮体動揺量の比較（手法①）

3.4.3 手法②について

次にカップリング手法②の検証を行うため、従来の MARIS の機能を用いて計算した結果と今回カップリング手法②にて計算した結果を図 13 に示す。3.3 に記載のとおり風外力の時系列データが異なるため、各時刻で同じ外力を与えているわけではないが、6 方向について、概ね同規模の動揺が確認できる。

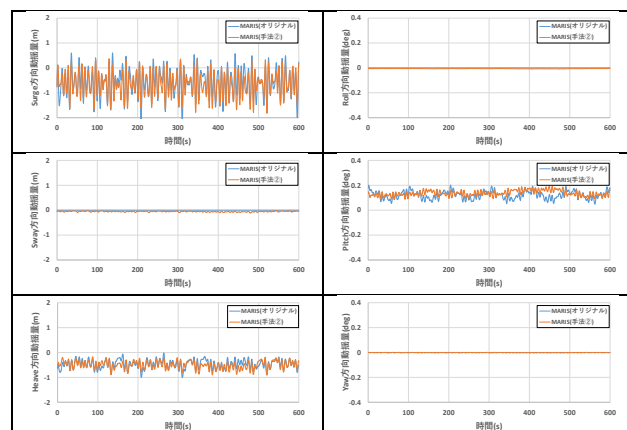


図 13 浮体動揺量の比較（手法②）

4 その他の取り組み

MHRT では洋上風力分野により適した解析を行うため、その他にも MARIS に対して改良を行っており、ここではその概要を紹介する。

4.1 遅延関数型運動方程式を用いた複数浮体解析

洋上風力分野については、今後発電施設の建設、運用を考えた際には、施工時や点検時に洋上風車などの浮体本体と作業船それぞれが波力等を受けて動揺することが想定される。そのため、それらの挙動を同時に考慮した複数浮体の動揺シミュレーションにもニーズがあると考えられ、MHRT では遅延関数型運動方程式を用いた複数浮体解析にも取り組んでいる。

例えば起重機船と吊荷を想定した複数浮体の概要図を図 14 に示す。

対象とする複数浮体

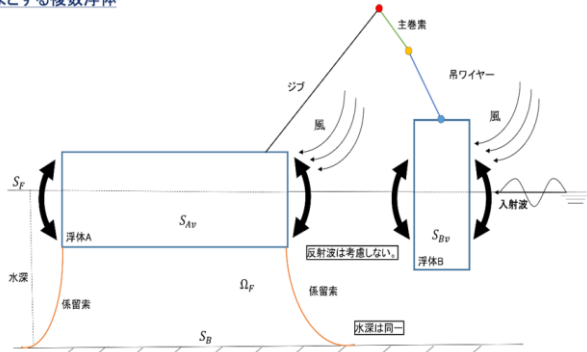


図 14 複数浮体概要図

このような 2 浮体に対して、以下のようにポテンシャルを仮定することで複数浮体の動揺解析を行うことができる。

$$\Phi(x, y, z, t) = \left[\frac{g\xi_0}{\omega} \{ \phi_0(x, y, z) + \phi_d(x, y, z) \} + \sum_{j=1}^6 \frac{gX}{\omega} \phi_{Aj}^r(x, y, z) + \sum_{j=1}^6 \frac{gX}{\omega} \phi_{Bj}^r(x, y, z) \right] e^{-i\omega t} \quad (10)$$

ここで、 Φ : 動揺する浮体周辺の速度ポテンシャル、 g : 重力加速度、 t : 時間、 ϕ_0 : 入射波ポテンシャル、 ϕ_d : diffraction ポテンシャル、 ϕ_j^r : radiation ポテンシャル、 ξ_0 : 波高、 ω : 波周波数であり、 ϕ_{Aj}^r : 浮体 A における j モード運動の radiation ポテンシャル、 ϕ_{Bj}^r : 浮体 B における j モード運動の radiation ポテンシャルである。

計算した結果例を図 15 に示す。MHRT では、上記のモデルを用いて複数浮体動揺計算を行った際に、運動方程式による違いや浮体間の距離に応じた動揺の違い等について検討を行っており、詳細は後報に

記載したい。

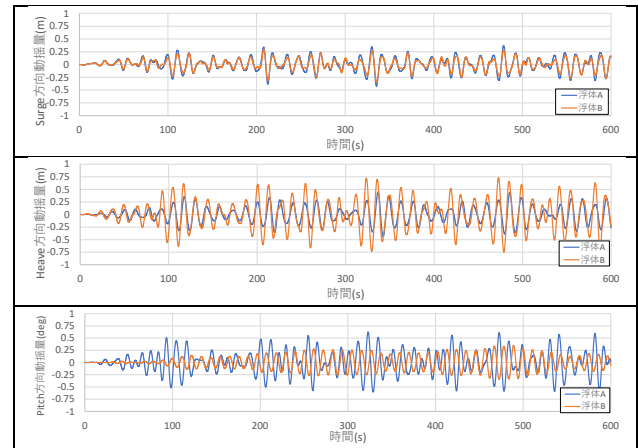


図 15 複数浮体動揺解析例

4.2 細部材の弾性変形解析

浮体式洋上風力には、3 章に記載したバージ型に加え、スパー型やセミサブ型などがあり、バージ型やスパー型における浮体動揺解析では、浮体を剛体として 1 質点系モデルとして考慮することが多い。一方でセミサブ型では、太い部材間を結ぶ部材は細く、弾性変形を考慮した計算を行う必要がある。弾性変形を考慮できる洋上風力分野の解析コードとしては、東京大学らの NK-UTWind⁸⁾ などがあるが、MARIS においても弾性変形を考慮する改良を加え、弾性変形までを含めた動揺解析に取り組んでいる。

図 16 にセミサブ型の細部材に関する要素分割について示す。

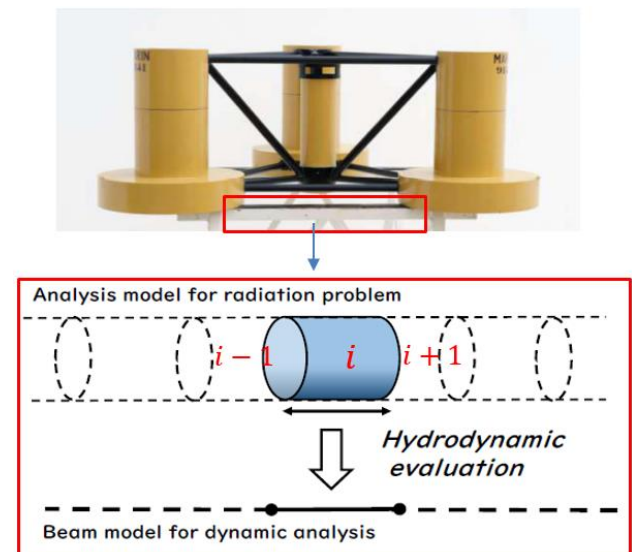


図 16 細部材モデル化例⁹⁾

ここで遅延関数を用いた場合の弾性変形については、

各要素の流体力を用いて以下の運動方程式を解くことで求めることができる。

$$(m_i^e + M_i^e(\infty))\ddot{x}_i^e + D_i\dot{x}_i^e + k_i^e x_i^e + \int_0^{t_e} L_i^e(t-\tau)\dot{x}_i^e(\tau)d\tau = F_i^e(t) \quad (11)$$

なお、 x_i^e : i 番目梁要素の要素変位、 m_i^e : i 番目梁要素の質量、 $M_i^e(\infty)$: i 番目梁要素の不変付加質量、 $L_i^e(\infty)$: i 番目梁要素の遅延関数、 k_i^e : i 番目梁要素の要素剛性マトリクスである。このとき各要素の不変付加質量と特定周波数における付加質量および各要素の質量を比較した例を図 17 に示す。このような比較を行うことで、細部材の弾性変形計算において、遅延関数を用いた不変付加質量を算出することの意義について検討を行った。こちらについても詳細は後報に記載したい。

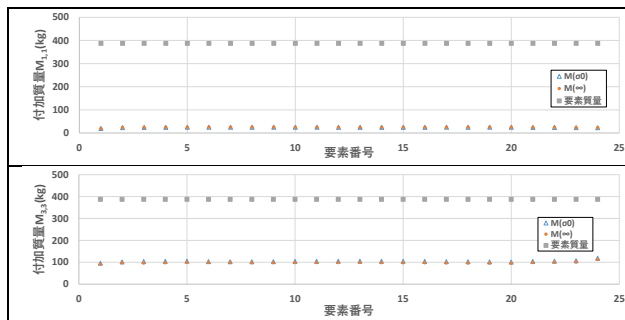


図 17 細部材の不変付加質量検討例

5 おわりに

本稿では、MHRT が保有する浮体動揺解析ソフトウェアである MARIS と洋上風力発電の解析ソフトウェアである OpenFAST における機能の違いを整理するとともに、両者をカップリングした事例やその検証について紹介した。また洋上風力分野への適応に向けて MARIS のモデル改良を行った事例についても紹介した。

MHRT では継続的に MARIS の改良を行っており、引き続き浮体式洋上風車の解析に適用するための改良を行い、当該分野の技術開発に貢献していきたいと考えている。

※「MIZUHO_MARIS-II」は株式会社みずほフィナンシャルグループの登録商標です。

引用文献

- 1) 福島洋上風力コンソーシアム,
<http://www.fukushima-forward.jp/>, (参照 2024-01-17)
- 2) 坂本大樹・吉村英人・眞鍋尚. 浮体式洋上風力発電に関わる数値シミュレーションの利用状況と MHRT の取り組み. みずほリサーチ&テクノロジーズ技報, Vol. 2, pp49-56, 2022.
- 3) 船舶・海洋構造物動揺解析システム MARIS,
<https://www.mizuho-rt.co.jp/solution/research/digital/construction/maris/index.html>, (参照 2024-01-17)
- 4) NREL, OpenFAST documentation release v3.0.0, 2021
- 5) 眞鍋尚. 遅延関数を用いた浮体の動揺シミュレーション. 富士総研技報, Vol. 8, No.1, pp116-131, 2003.
- 6) WAMIT, <https://www.wamit.com/>, (参照 2024-01-17)
- 7) Jonkman J : Dynamics Modeling and Loads Analysis of an Offshore Floating Wind Turbine, *National Renewable EnergyLaboratory*, 2007.
- 8) 福王翔. 流体力モデルによるセミサブ型浮体式洋上風車の動的応答への影響. 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.22, pp539-549, 2019.
- 9) Robertson A, Jonkman J, Masciola M, Song H, Goupee A, Coulling A and Luan C : Definition of the semisubmersible floating system for phase II of OC4, *National Renewable EnergyLaboratory*, 2014.
- 10) 国土交通省海事局 : 浮体式洋上風力発電施設技術基準安全ガイドライン, (2020)