

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 5 月 22 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01631

研究課題名(和文) 浮体式洋上風車の風車-浮体-係留-制御連成応答解析法の高度化に関する研究

研究課題名(英文) A Research on Advanced Analysis Code of Rotor-Floater-Mooring-Control Coupled Dynamic Response of a FOWT

研究代表者

鈴木 英之 (Suzuki, Hideyuki)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・教授

研究者番号：00196859

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,800,000円

研究成果の概要(和文)：研究成果の第一は、浮体式洋上風車の“風車-浮体-係留-制御連成応答解析法”の高度化を担い、浮体式支持構造物の動的応答の解析機能に着目して、ポテンシャル論に基づき、剛体運動に加えて弾性応答も計算できる、時間領域の解析法の開発であり、開発を終えた。

第二の成果は、風車設置海域に侵入してきた漂流船舶と浮体式洋上風車の衝突により係留系が破断し、浮体式洋上風車が連鎖的に漂流する過程を追える解析手法の開発である。船舶の漂流挙動を表現する数値モデルの高度化を行い、連鎖漂流シミュレーターを完成させ、漂流船舶が浮体式洋上風車で構成されるウインドファームに侵入した場合の挙動およびリスクの試計算を実施した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

浮体式洋上風車は、わが国が欧米と開発競争を繰り広げている分野である。わが国が2050年カーボンニュートラルを目指すなかで、技術レベルを着実に向上させて、日本周辺海域における洋上風力エネルギー開発を推進する必要がある。本研究テーマは浮体式洋上風車の安全性や機能性を評価する上で、自然環境中における浮体式洋上風車の挙動を解析する“風車-浮体-係留-制御連成応答解析法”の高度化を目的としたものである。連鎖漂流評価法は、商業化の段階に至った場合に必要となる、プロジェクトのリスク解析や評価に係る内容である。いずれも、わが国が海外技術に頼ることなく開発を進める上で必要となる技術の開発である。

研究成果の概要(英文)：The first of the research results is development of the time domain dynamic analysis method of the structural response of a floating support structure based on the potential theory in addition to the analysis function of rigid body motion. This is a sophistication of the "Rotor-Floater-Mooring-Control Coupled Response Analysis Method" of the floating offshore wind turbine, and the development was completed.

The second result is the development of a simulator that can follow the process in which the mooring system breaks due to the collision between the floating offshore wind turbine and the drifting vessel which has entered the wind farm, and the floating offshore wind turbines drift in a chain reaction. The numerical model that describes the drifting behavior of a ship was improved and incorporated into the simulator. The trial simulation of the behavior and risk when the drifting ship entered a wind farm composed of floating offshore wind turbines was performed.

研究分野：海洋システム工学

キーワード：浮体式洋上風車 浮体-係留連成応答解析法 ポテンシャル理論 弾性相似模型 連鎖漂流リスク解析

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

浮体式洋上風車は、わが国が欧米と開発競争を繰り広げている分野である。本研究テーマは浮体式洋上風車の安全性や機能性を評価する上で必要となる、自然環境中における浮体式洋上風車の挙動を解析する“風車-浮体-係留-制御連成応答解析法”の高度化を目的としたものである。連鎖漂流評価法は、連成応答解析法の機能のうち、商業化の段階に至った場合に特に必要となるもので、プロジェクトのリスク解析や評価に係るものである。いずれも、わが国が海外技術に頼ることなく浮体式洋上風車の開発を進める上で必要となる技術の開発である。

研究実施中に、わが国が2050年カーボンニュートラルを目指すことが目標になり、技術レベルを着実に向上させて、日本周辺海域における洋上風力エネルギー開発を推進することがますます重要になっている。

2. 研究の目的

研究の目的の第一は、浮体式洋上風車の“風車-浮体-係留-制御連成応答解析法”の高度化を狙い、浮体式支持構造物の動的応答の解析機能に着目して、ポテンシャル論に基づき、剛体運動に加えて弾性応答も計算できる、時間領域の解析法の開発である。

第二の目的は、風車設置海域に侵入してきた漂流船舶と浮体式洋上風車の衝突により係留が破断し、浮体式洋上風車が連鎖的に漂流する過程を追える解析手法の開発である。船舶の漂流挙動を表現する数値モデルの高度化を行い、連鎖漂流シミュレーターを完成させ、検証の上、漂流船舶が浮体式洋上風車で構成されるウインドファームに侵入した場合の挙動およびリスクの試算を実施する。

3. 研究の方法

“風車-浮体-係留-制御連成応答解析法”については、風車部と浮体部を各々時間領域で解き、時間領域で連成させるプログラムであり、このカテゴリーに含まれるUTWindは当研究グループが開発を進めてきたプログラムである。本研究ではポテンシャル論に基づいた波力評価を行えるように開発を行った。Morison式に含まれる粘性影響の項は残しつつ、F.K.力、Diffraction力、Radiation力をPotential論に基づいて評価するとともに、浮体部分を弾性体として取り扱っている。

連鎖的に漂流する過程を追える解析手法の開発については、ウインドファーム付近を航行する船舶が何らかの原因で動力を失って漂流し、ウインドファームに進入して浮体式洋上風車と衝突し、係留索破断により風車が漂流し、漂流船舶がさらに連鎖的に衝突漂流を発生させるリスクについて、リスク評価式の定式化を行い、漂流衝突過程の再現精度を向上するため、漂流船舶の運動を表す、より精度の高い数値モデルを開発して漂流シミュレーターに組み入れた。

4. 研究成果

(1) 連成応答解析法の高度化

流体力の定式化

弾性変形の影響を考慮して流体力を評価する場合、剛体運動と弾性モードを合わせた変位ベクトル u^p を用いて流体力を表すと次式で与えられる。

$$\begin{aligned}
F_f(t) &= \begin{bmatrix} A_1^r(\infty) & A_1^e(\infty) \\ \vdots & \vdots \\ A_N^r(\infty) & A_N^e(\infty) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{u}^r(t) \\ \ddot{u}^e(t) \end{pmatrix} + \int_{-\infty}^t \begin{bmatrix} L_1^r(t-\tau) & L_1^e(t-\tau) \\ \vdots & \vdots \\ L_N^r(t-\tau) & L_N^e(t-\tau) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \dot{u}^r(\tau) \\ \dot{u}^e(\tau) \end{pmatrix} d\tau \\
&= \begin{bmatrix} A_1^r(\infty) & A_1^e(\infty) \\ \vdots & \vdots \\ A_N^r(\infty) & A_N^e(\infty) \end{bmatrix} \ddot{u}^P + \int_{-\infty}^t \begin{bmatrix} L_1^r(t-\tau) & L_1^e(t-\tau) \\ \vdots & \vdots \\ L_N^r(t-\tau) & L_N^e(t-\tau) \end{bmatrix} \dot{u}^P d\tau
\end{aligned} \tag{1}$$

ここに、各係数 $A_n^r(\infty), A_n^e(\infty), L_n^r(t), L_n^e(t)$ は周波数領域のポテンシャル解析法により得られる。

風車-浮体-係留-制御連成応答解析法「NK-UTWind Potential」の検証と応答評価

セミサブ型浮体式洋上風車の代表例として OC5 DeepCWind を参考にして Fig.1 に示すセミサブ型浮体を作成した。ポテンシャル理論の周波数領域の流体力計算は WAMIT を用いて行った。応答解析結果の比較を Fig.2 に示す。WAMIT による応答計算では粘性項が考慮されていないことからフーティングの抗力評価が過少になり、固有周波数における無次元応答は過大評価となっているが、時間領域で解いた NK-UTWind Potential では粘性項を考慮しているため、実験結果とよく一致した。流体力を Morison 式を用いて評価した結果ともおおむね一致している。

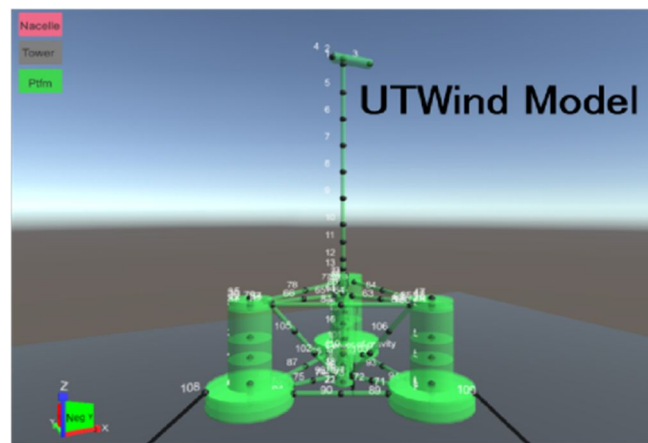


Fig. 1 比較計算用浮体モデル.

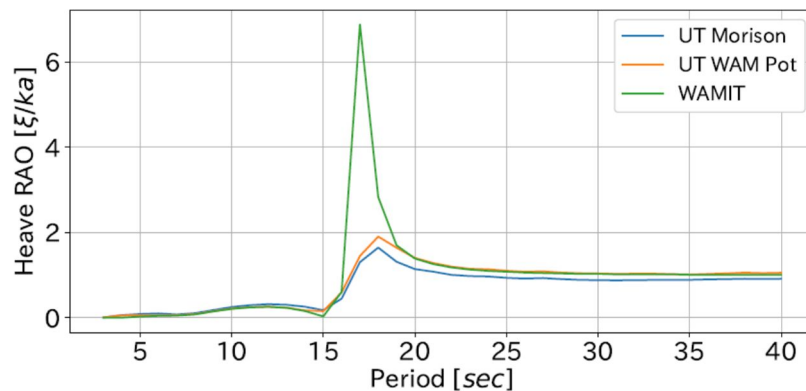


Fig. 2 NK-UTWind と WAMIT によって得られた Heave の RAO.

(2) 連鎖漂流リスクの評価

リスク評価式

漂流船舶と風車の衝突による風車漂流リスクの算定法について検討した結果、最も妥当な評価式として次式を得た。

$$\begin{aligned} \text{船舶 風車衝突と風車漂流の基数期待値} = & \\ \sum_s \sum_y \sum_v \sum_\theta P_w(\theta, v) \frac{1}{N_{ship}} P_t(S) D(\theta, v, y, S) & \quad (2) \\ & \times \text{海難事故を起こす船舶の隻数期待値} \end{aligned}$$

ここに、

- θ : 風向
- v : 風速
- y : 船舶漂流開始位置
- S : 船舶の種類
- P_w : 風向・風速の発現確率
- N_{ship} : 船舶漂流開始位置のパターン数
- P_t : ある種類の船舶が船舶事故全体に占める割合
- D : 一隻の船舶が海難事故を起こした時の船舶 風車衝突や風車漂流の期待値

漂流シミュレーター

船舶-風車漂流シミュレーションでは、船舶とウインドファーム内の風車について、(3)式で表される浮体の運動方程式を、浮体固定座標系で Newmark- 法を用いて解くことで漂流運動を計算する。

$$\begin{aligned} (m + m_x)\dot{u} - (m + m_y)vr &= X_{wind} + X_H + X_{wave} \\ (m + m_y)\dot{v} + (m + m_x)ur &= Y_{wind} + Y_H + Y_{wave} \\ (I_{zz} + J_{zz})\dot{r} &= N_{wind} + N_H + N_{wave} \end{aligned} \quad (3)$$

ここに、

- m : 船舶の質量
- m_x : 船舶の前後方向付加質量
- m_y : 船舶の横方向付加質量
- I_{zz} : 船舶の慣性モーメント
- J_{zz} : 船舶の付加慣性モーメント
- X_{wind}, Y_{wind}, N_{wind} : 風圧力の前後力、横力、回頭モーメント
- X_H, Y_H, N_H : 流体力の前後力、横力、回頭モーメント
- X_{wave}, Y_{wave}, N_{wave} : 波漂流力の前後力、横力、回頭モーメント

風圧力の評価は、藤原[1]が提案した式を用いた。

$$\begin{aligned} X_{wind} &= \frac{1}{2} \rho_{air} C_X U_A^2 A_F \\ Y_{wind} &= \frac{1}{2} \rho_{air} C_Y U_A^2 A_L \\ N_{wind} &= \frac{1}{2} \rho_{air} C_N U_A^2 A_L L_{OA} \end{aligned} \quad (4)$$

ここに、

- ρ_{air}: 空気の密度

- L_{OA} : 船体全長
- A_F : 水面上船体の正面投影面積
- A_L : 側面投影面積

漂流モデルの妥当性検討

本研究の漂流モデルの妥当性は、高瀬[2]による実験結果と芳村[3]の船舶運動シミュレーションの比較により確認した。貨物船(30,000GT)について、1/61.19の模型船を用いて実施した漂流実験と解析結果の比較を Fig.3 に示す。

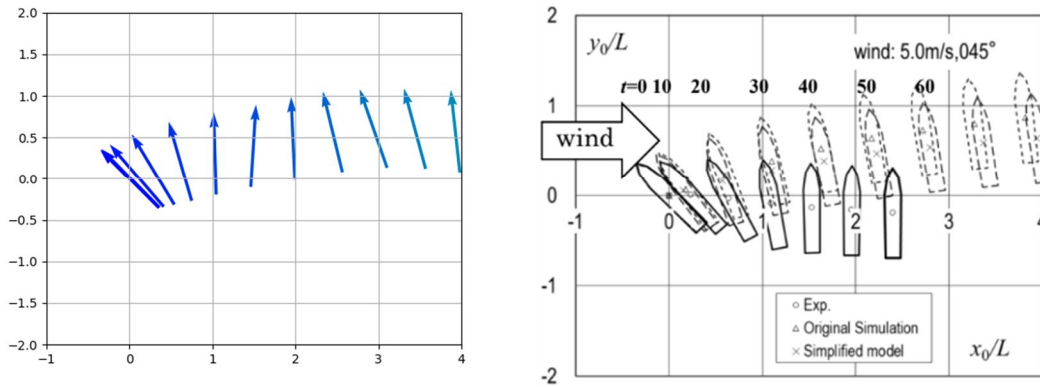


Fig.3 漂流実験結果(左)と漂流シミュレーション結果(右)の比較。

具体的なリスク解析結果

福島沖に浮体式洋上風車を 10×10 配置したウインドファームを設定し、風車事故のリスクを評価した結果、船舶漂流による風車事故リスクを安全工学上の観点で許容される範囲内に抑えるためには、ウインドファームを航路から 5000m 以上離して設置するとよいという結果になった。

係留系の破断モデルの高度化に向けた検討

浅海域を対象にして、全チェーンと最近研究が行われている合成繊維ロープを利用した係留索について、動的影響が発生張力に及ぼす影響を把握するために、動力的に相似な縮尺模型を製作して水槽実験により発生張力に動的な特性を把握した。

(3) 参考文献

- 1) 藤原敏文, 上野道雄, 二村雄, “船体に働く風圧力の推定,” 日本造船学会論文集, 第 183, pp.77-90, 1998.
- 2) 高瀬康一, “洋上風力発電ウインドファームにおける漂流船舶による漂流リスク評価法,” 東京大学 修士論文, 2018.
- 3) 芳村康男, 高瀬康一, 福井寛史, 鈴木英之, 平林紳一郎, “風力下で漂流する船舶の簡易数学モデルによる運動シミュレーション,” 日本船舶海洋工学会, 第 28 号, pp.523-528, 2019

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Sho Oh, Kimiko Ishii, Kazuhiro Iijima, Hideyuki Suzuki	4. 巻 1104
2. 論文標題 Implementation of potential flow hydrodynamics to time-domain analysis of flexible platforms of floating offshore wind turbines	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Physics, Conference Series	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 A.Adilah, 樺島雷人, 飯島一博, 福王翔, 鈴木英之	4. 巻 A論文
2. 論文標題 風波複合荷重下のスパー型FOWTの疲労評価のための確率論的手法	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 JCOSSAR	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 芳村康男, 高瀬康一, 福井寛史, 鈴木英之, 平林紳一郎	4. 巻 -
2. 論文標題 風力下で漂流する船舶の簡易数学モデルによる運動シミュレーション	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本船舶海洋工学会論文集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takata Taisuke, Takaoka Mayuko, Gon?alves Rodolfo T., Houtani Hidetaka, Yoshimura Yasuo, Hara Kentaro, Oh Sho, Dotta Ra?I, Malta Edgard B., Iijima Kazuhiro, Suzuki Hideyuki	4. 巻 9
2. 論文標題 Dynamic Behavior of a Flexible Multi-Column FOWT in Regular Waves	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Marine Science and Engineering	6. 最初と最後の頁 124 ~ 124
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/jmse9020124	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Hideyuki Suzuki
2. 発表標題 Combined Wave and Wind Basin Testing of a Very Light Floating Offshore Wind Turbine with Guy Wires
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会秋季講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福王翔
2. 発表標題 ポテンシャル論を使用した浮体式風車支持物の三次元弾性モデルの時刻歴解析
3. 学会等名 第41回風力エネルギー利用シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 芳村康男
2. 発表標題 風力下で漂流する船舶の運動シミュレーション
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会春季講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sho Oh, Kimiko Ishii, Kazuhiro Iijima, Hideyuki Suzuki
2. 発表標題 Implementation of potential flow hydrodynamics to time-domain analysis of flexible platforms of floating offshore wind turbines
3. 学会等名 DeepWind 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	平林 紳一郎 (Hirabayashi Shinichiro) (90463877)	東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授 (12601)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------