

洋上浮体式風車の係留システムの安全性評価

Safety Evaluation of Mooring System for Offshore Floating Wind Turbine

学籍番号 47116638 菊池 紘樹

指導教員 鈴木 英之 教授 平林 紳一郎 講師

(平成 25 年 3 月 5 日)

Keywords: 浮体式洋上風車, 連成応答解析, 係留, 疲労, カテナリー

Keywords: Offshore Wind Turbine, Coupled Response Analysis, Mooring, Fatigue, Catenary, Lumped Mass Method

1. 序論

洋上浮体式風力発電の大きな課題の一つとして発電コストの問題がある。石油開発などの浮体式施設の場合は係留索はその寿命以内に交換されることが多いが、浮体式風車の場合は係留索の交換によって経済性が大きく悪化するため、通常 20 年間とされる耐用年数内で交換せずに運用することが求められる。このような浮体式風車の低コストかつ安全な運用のためには、係留システムの安全性評価が不可欠である。係留索の寿命を支配する要因は疲労、摩耗、腐食などがあるが、本研究では疲労に着目する。一般的に海洋構造物の係留系の疲労は波によって決まる。しかし、浮体式風車の係留系の疲労は風と波の複合的な荷重に依存すると考えられるので、波と風を共に考慮する必要がある。

2. 目的

本研究では、浮体式風車の稼働寿命 20 年の間に交換を必要としない係留系の開発に向けて基礎的な検討として次の内容を実施する。

ランプドマス法を用いた既存の係留解析プログラム[1]を海底傾斜の影響を考慮に入れることが可能になるように改良するとともに数値計算安定化を図る。また水槽実験により係留プログラムの妥当性を検証する。

風車-浮体の連成応答プログラムである UTWind[2]に係留プログラムを組み込み、風車-浮体-係留の 3 パート連成応答解析プログラムを開発する。

UTWind による動的応答解析により係留索の張力変動を求め、係留システムの疲労評価を行う。

3. 研究の流れ

ランプドマス法を用いた既存の係留解析プログラムの改良を行い、水槽実験により、プログラムの検証を行う。その後福島沖を想定し、波頻度分布表[3]から有義波高・有義周期を読み取り、有義波高に応じた風速を与え、UTWind において不規則波・風を再現し解析を行う。再現年数 50 年間で係留にとって最も厳しい条件での解析から最大張力を求め、安全率を考慮しモデル化する係留索の設計を行う。その後、ランプドマス法を用いた係留プログラムを UTWind に連成させ、張力変動を調べる。最後に張力の時系列データをレインフロー法を用いて張力変動の大きさと頻度を求め、マイナー則に従い疲労被害を求め各海象条件の再現確率を掛けることを、様々な有義波高・有義周期において繰り返し行い、すべての海況での疲労被害を合計し疲労被害を求め、疲労評価を行う。

4. 係留プログラム

4.1 プログラムの開発

係留プログラムのフローチャートを Fig.1 に示す。幾何学的拘束条件および力の釣り合いから初期形状を決定する。ランプドマス法を用い係留索を弾性バネと質点に見做し運動方程式を立式する。運動方程式の解法には Houbolt 法を用いる。係留点を強制運動させ、各質点の位置・速度・張力を求める。本研究では海底の定義を改め、着底部には水中重量を打ち消す反力を与えた。タッチダウンの前後において上下方向の運動に対する減衰を高めるなどにより物理現象に近い表現とし、海底傾斜の影響を考慮できるように改良し、また

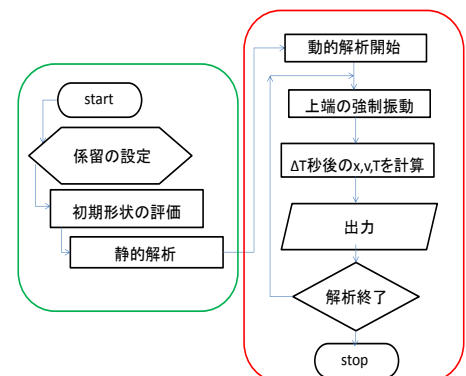
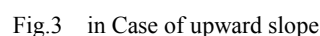
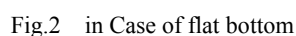


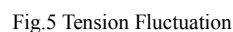
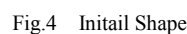
Fig.1 Mooring Program Flowchart

係留プログラムの検証を行うために水槽実験を行った。実験でモデル化するチェーンは実機スケールで係留長さ 432[m]、水深 75[m]、初期水平長 397.5[m]、呼び径 105[mm]である。実験のスケールは 1/150で、相似則はフルード則に従う。水槽実験では、風車が波・風の影響を受けて、特定の振幅・周期で動揺すると仮定し、正弦波的な動揺振幅・周期をモータを用い再現する。そして、チェーンをモータ部に取り付けで求めた張力変動と比較を行う。想定する調べるために、100[m]あたり ± 2 [m]の傾斜で示した条件での水平な海底での張力変動動(Fig.3)を示す。数値計算結果と実験結果

波			風車の動揺		模型実験	
有義波高 [m]	振幅 [m]	周期 [s]	振幅 [m]	周期 [s]	振幅 [mm]	周期 [s]
3.00	1.50	6.69	0.75	6.69	5.00	0.55
6.00	3.00	9.46	1.50	9.46	10.00	0.77



係留プログラムを用いて、傾斜のある海底の場合の係留索の形状および張力を求めた。傾斜が 100[m]に対し 0, ± 1 , ± 2 [m]である場合の係留系の形状は Fig.4, 100[m]に対し 0, ± 2 [m]の場合の張力変動を Fig.5 に示す。ここでアンカー地点の水深で 75[m]で共通とする。



5. UTWind との連成

```

graph TD
    INPUT[INPUT] --> WT_FD[風車・浮体設計]
    subgraph WT_FD_Part [風車・浮体設計パート]
        WT_FD --> WT_Part[風車パート]
        WT_FD --> FB_Part[浮体パート]
        
        subgraph WT_Part_Box [ ]
            direction TB
            BEM[BEM計算] --> MR_WT[運動応答計算]
            MR_WT --> RCF[ローター中心力]
        end
        
        subgraph FB_Part_Box [ ]
            direction TB
            WEF[波浪外力計算] --> MR_FB[運動応答計算]
        end
        
        MR_FB --> MR_WT
    end
    
    WT_FD --> MD[係留設計]
    subgraph MD_Part [係留設計パート]
        MD --> LMM[ランプドマス法による係留パート]
    end
    
    LMM --> TFC[係留点変位による発生張力計算]
    MR_FB --> TFC
    TFC --> MR_FB

```

Fig.6 UTWind Flowchart

バネとして扱っていたが、係留索の動的応答を解析するための係留プログラムを浮体パート組み込むことで、波や風による風車の動揺に連動した係留索の応答を知ることができる。本研究ではこの係留プログラムを UTWind の浮体パートと連成させている。本研究での UTWind 全体のフローを Fig. 6 に示す。

浮体設計主要目[2]を Table 3 に示す。Fig. 7 に示すセミサブ型浮体モデルの4本のコラムにはそれぞれランプドマス法によってモデル化した係留索を取り付けている。

Table 3 Principal Design of Semi-sub Model[2]

Item	Value	Unit
Displacement	9603.85	ton
Mass of Wind Turbine	700	ton
Mass of Floater	3913.29	ton
Mass of Ballast	4990.56	ton
Aided Mass of Surge and Sway	8849.87	ton
Aided Mass of Heave	12563.15	ton
KB	8.65	m
BM	16.74	m
KG	18.33	m
GM	18.33	m
KI	7.79	m
Rotatory Inertia	2.25×10^{10}	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$

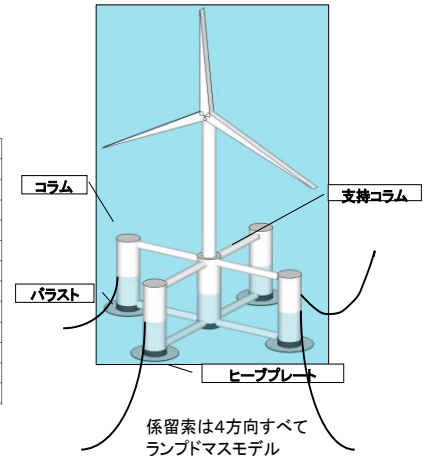


Fig.7 Image of semi-sub Model[2]

5.1 係留索の設定・張力変動解析

本モデルに用いる係留索は、福島沖での既往最大の有義波高[4]を記録した台風 1012 号での有義波高 7.78[m]、有義周期 10.6[s]の海況で不規則波・風を一方向から与え、様々なサイズの係留索[5]に対し UTWind を用い通常の海洋観測に対応させて、20 分間の計算から統計値を推定して、最大張力を評価した。その後 API 規格に従い、係留の動的解析を行った場合の係留索の安全率は 1.67 を満たす係留索を本モデルで用いる係留索と設定した。係留索の物性値等を Table 4 に示す。この条件での浮体の変位および係留点での張力変動をそれぞれ Fig. 8, Fig.9 に示す。

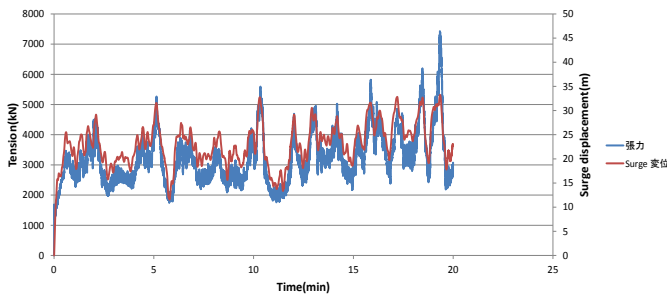


Fig.8 Comparison Tension with Surge Displacement

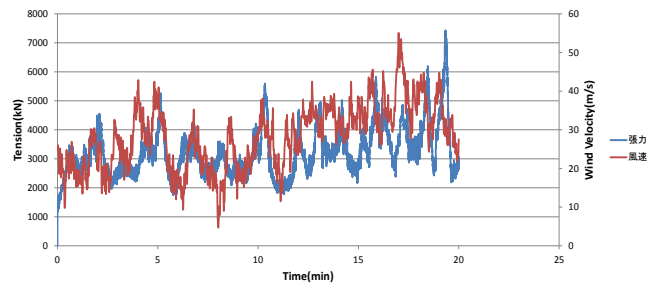


Fig.9 Comparison Tension with Velocity

張力変動は、風速変動や不規則波が組み合わさり起こっている、Surge 方向に定常的に力がかかり、係留が大きく変位し係留索が張っている状況で、波もしくは風により変動的に大きな荷重がかかる場合に、張力が急激に大きくなることが確認でき、バネ定数が大きくなるカテナリー係留の特徴が表れている。その時浮体-係留系の固有周期が短くなり、波力の影響を受けやすくなる。逆に Surge 方向にかかる定常的な力が弱くなり、係留が緩んでいる状況で波もしくは風による変動的に大きな荷重がかかる場合には、張力は大きく変動しないことが確認できる、つまり張力の最大値と最小値において非対称性が生じている。

Table 4 Design of Chain

係留方式	カテナリー係留
係留索	第3種チェーン(R4)
呼び径(mm)	132
切断試験荷重(kN)	11420
安全率	1.67
係留索長さ(m)	600
初期水平長(m)	550
初期垂直長(m)	150
質量(kg/m)	381.6
水中重量(kg/m)	335
断面積(m ²)	0.013684778
ヤング率(N/m ²)	4.38E+10

6. 疲労評価

本モデルに波頻度分布表[3]を基に Table 5 の条件で解析を行い、張力変動の時刻歴データをレインフロー法を用い張力の振幅とある振幅の発生回数を求めた結果が Table 6 である。このグラフから変動の大きさと頻度を求める。疲労評価は式(1)のマイナー則に従う[5]。スタッド付き係留索の T-N カーブ[5]から式(2)を導くことができる。

$$D = \sum \frac{n_i}{N_i} \quad (1)$$

Table.5 Analysis Condition

海象条件	有義波高[m]	有義周期[s]	平均風速[m/s]
条件1	7.75	12	30
条件2	7	11	27.5
条件3	6	10.5	25
条件4	4.75	9	20
条件5	3	7	15
条件6	1.5	6	10
条件7	0.75	5	5

n_i : ある張力幅 i の1年間あたりでの発生回数
 N_i : T - N カーブ[5]において無次元張力幅 i での破断に至る回数

$$\text{number of cycle: } N = \left(\frac{\text{Reference Break Strength}}{\text{Tension Range}} \right)^{6.0} \quad (2)$$

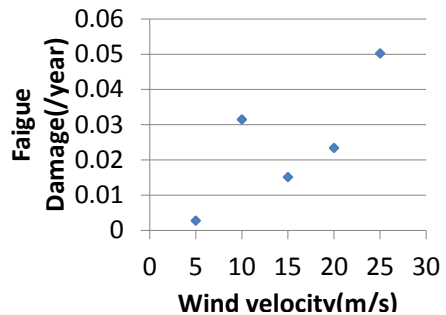
疲労被害 D_k はある海象条件での疲労被害であり、この海象の再現確立を P_k とおくと、その海域の N 年間の疲労被害 D_n は $D_n = N \times \sum P_k \times D_k$ と求まる。 D_n が1よりも大きければ破断、1よりも小さければ破断しないと判断する。結果を Table 6 に示す。結果として疲労被害の値は2年以内に疲労により破断するという結果が出たが、風波とも一方向からのみ与えているので疲労被害を過大評価している。

Table 6 Fatigue Damage

海象条件	最大張力(kN)	1年間における 海象発生時間(h)	疲労被害 (/year)	破断年数 (year)
条件1	8515.9	0.724	1.61E-01	6.197
条件2	7205.7	5.120	2.51E-01	3.981
条件3	4753.1	14.934	5.03E-02	19.899
条件4	3578.7	79.941	2.34E-02	42.715
条件5	2464.6	1516.897	1.51E-02	66.113
条件6	2236.9	4426.440	3.15E-02	31.751
条件7	1118.1	2714.871	2.78E-03	359.286
計		8758.927	5.36E-01	1.867

ケース 2, 3 において係留索の疲労被害が大きいたことが明らかになった。これらのケースの場合、バネ定数が大きくなることで浮体 - 係留系の固有周期が短くなり、波力の影響を受けやすくなる。

また Fig. 10 では風速と疲労被害の関係を表している。本モデルのスラスト力は定格の 12[m/s]時が最大で 8.0×10^5 [N] であり、10[m/s]時は 4.0×10^5 [N]、15[m/s]時は 4.5×10^5 [N] である[9]。スラスト力の大きさはほぼ同じではあるが、定格風速以下では定格風速以上に比べ、風速変動に対するスラスト力の変動が大きい。この変動幅の大きさの違い、および海象発生時間の違いによってケース 6 の方が疲労被害が大きくなる。



以上よりこの風速による疲労影響の違いの原因は風車の風速によるスラスト力の違いである。

7. まとめ

ランプドマス法を用いた係留プログラムを改良し、海底傾斜および摩擦影響の考慮、および数値計算安定化を実現した。水槽実験により係留プログラムの妥当性の確認と海底傾斜影響の検証を行った。さらに係留プログラムを UTWind の係留パートに組み込み、風車-浮体-係留の3パート連成解析プログラムを開発した。本プログラムにより洋上浮体式風車の係留索の動的解析を行うことができるようになった。その結果、係留系の疲労影響は海象が荒い条件では波力の影響を、定格風速前後では風速による変動の大きいスラスト力の違いによる影響を受け風車特有の挙動を示すことを明らかにした。また、疲労評価の結果 6 年以内に疲労により破断するという結果を得た。これは風・波を同一方向から与えたため、過大評価している。方向の違いを考慮した上で耐用年数 20 年間交換せずに、運用し続けるのはさらに検討する必要がある。

8. 今後の課題

本研究で用いた UTWind は、漂流力の検証が行われていない。そこで水槽実験などにより検証する必要がある。実海域のように風向と波方向が一致していない場合の影響を評価すること。また現在では計算時間の問題から 20 分間のデータを用いていたが、統計的に精度を向上させるためには長時間の解析をすることが今後の課題である。

参考文献

- [1] 小澤暁人：浮体式洋上風力発電のためのハイブリッド研究に関する一考察，学士論文，東京大学 (2011)。
- [2] 藤岡弘幸：浮体式洋上風車の風車-浮体連成応答解析法の開発及び連成応答特性に関する研究，修士学位論文，東京大学 (2012)。
- [3] http://www.nmri.go.jp/wwwjapan/namikaze_main.html
- [4] 港湾空港技術研究所 TECHNICAL NOTE OF THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE No.1248
- [5] API, API RECOMMENDED PRACTICE 2SK THIRD EDITION, 2008
- [6] NK 鋼船規則 L 編 艀装品(2009)