

係留系強度モデルを用いた

ウインドファームにおける浮体式風車の連鎖漂流事故リスク評価

The Risk Assessment of Progressive Drifting of Floating Wind Turbines in a Wind Farm

学籍番号 086804 北原 悠
 指導教員 鈴木 英之 教授

(平成 22 年 3 月 24 日修了予定)

Keywords: 浮体式風車, 連鎖漂流, 係留, 安全率, 再現期間

Keywords: Floating Wind Turbine, Progressive Drifting, Mooring, Factor of Safety, Return Period

1. 序論

1.1. 研究背景

日本での風力発電の発展を考えた時, 地理的要因から浮体式風車を用いた洋上での風力発電が重要となる. その中でも, 本研究室では特に Spar 型風車に注目し, その構造・挙動等について数々の研究がなされてきた. しかし, 現実に Spar 型風車 (以下, 浮体とも呼ぶ) によるウインドファーム (以下, WF) の実現を考えた場合, その事故リスクについても評価する必要がある. WF において最も被害が大きいと考えられる事故は, WF 上で何らかの理由で漂流してしまった浮体が別の係留浮体を巻き込んで複数基の漂流に発展する連鎖漂流事故である.

1.2. 先行研究

WF での連鎖漂流事故リスクの定量的な評価に関しては栗本(2008)によって先行研究がなされた^[1]. それによりリスクの考え方や基礎的な研究方法は確立されたが, 以下のような改良点も残っている.

- 係留索の摩耗等による強度の低下・ばらつきを考慮していない.
- Spar 型風車の漂流開始条件として, 係留索の破断のみを考慮しており, アンカーの引き抜け・引き摺りを考慮していない.
- WF での連鎖漂流事故リスクについて, 一部確率論ではなく決定論的に算出している.

1.3. 目的

そこで本研究の目的は, Spar 型風車を用いた WF での連鎖的な漂流事故リスクをより詳細に定量的に評価することである. そのために, 時系列変動風・不規則波の導入による, より再現性の高い Spar 型風車漂流シミュレーターと, 係留系強度低下・ばらつきモデルを開発し, それらを用いてより詳細なリスク算出とその評価を行う.

2. 漂流シミュレーター

2.1. 想定するウインドファーム

想定海域は銚子沖の東約 20km 地点付近とした. 想定する WF および Spar 型風車の構造・寸法を Fig.1, Fig.2, Table.1 に示す.

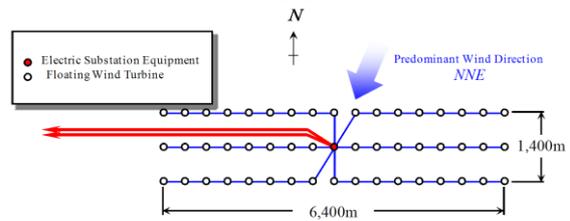


Fig.1 The array of floating wind turbines in a wind farm

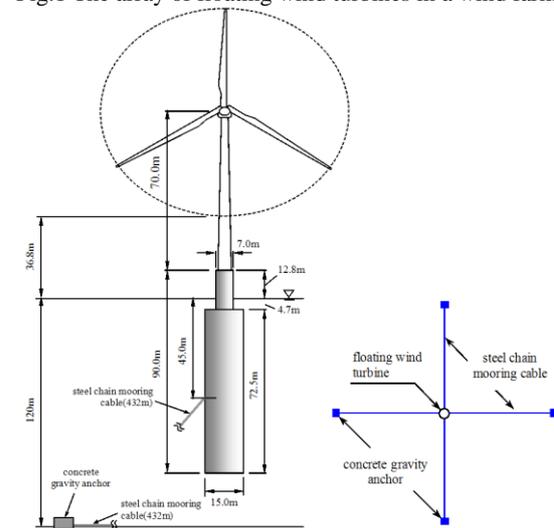


Fig.2 The structure of the RC spar type wind turbine

Table.1 Mooring system

Mooring method	Catenary
Factor of Safety	3.0
Mooring line	Third-class chain (125 mm diameter)
Weight of underwater portion per unit length	2.94 kN/m
Quantity	4
Length	432 m

2.2. シミュレーターの概要

Spar 型風車を 2 次元平面内の剛体として, 浮体固定座標系における運動方程式を 4 次精度ルンゲクッタ法を用いて解く (式(1), (2)). その際に考慮する外力は風抗力 F_{wind} ・潮流力 $F_{current}$ ・波漂流力 F_{drift} ・変動波力 F_{wave} ・衝突力 $F_{collision}$ ・係留力 F_{moor} である.

$$\begin{aligned} m(\ddot{u} - v\dot{\theta}) &= F_x \\ m(\ddot{v} + u\dot{\theta}) &= F_y \\ I\ddot{\theta} &= M_z \end{aligned} \quad (1)$$

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \end{pmatrix} = \mathbf{F}_{wind} + \mathbf{F}_{current} + \mathbf{F}_{drift} + \mathbf{F}_{wave} + \mathbf{F}_{collision} + \mathbf{F}_{moor} \quad (2)$$

$$M_z = M_{rotor} + M_{moor}$$

m : 浮体の質量 (kg)

u, v : 浮体固定座標系での浮体の x, y 方向速度 (m/s)

θ : 浮体の z 軸回りの (yawing) 回転角 (rad)

I : 浮体の z 軸回りの慣性モーメント ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)

F_x, F_y : 浮体固定座標系での、浮体に作用する x, y 軸方向の荷重 (N)

M_z : 浮体にかかる yawing 回転モーメント ($\text{N} \cdot \text{m}$)

M_{rotor} : 風荷重による回転モーメント ($\text{N} \cdot \text{m}$)

M_{moor} : 係留力による回転モーメント ($\text{N} \cdot \text{m}$)

なお、シミュレーター中での海象条件については、風は日野スペクトルによる変動成分を加えた時系列変動風^[2]、波は Bretschneider-Mitsuyasu スペクトルによる不規則波を用いた^[3]。潮流は一定とした。波のパラメータとなる有義波高・有義波周期は 10 分平均風速から決定し、その際の対応関係は、独立行政法人海洋技術安全研究所の波と風データベースおよび SMB 法 (Wilson の IV 型) による波浪推算から算出した^[3,4]。

3. 係留系強度モデル

3.1. チェーン係留索強度確率モデル

船に使われていたチェーン係留索の使用年数と摩耗のデータから、係留索の摩耗による強度低下モデルを作成した^[5]。

その結果、チェーン係留索を構成する各鎖環の $t+1$ 年目の切断荷重は、式(3)に示す平均 μ_t と標準偏差 σ_t となり、これが正規分布に従うとした時、各鎖環の切断荷重の最小値に等しい 1 本の係留索の破断強度は、式(4)の二重指数分布に従う。

$$\begin{aligned} \mu_t [\text{tf}] &= 1061.8 \times (1 - 0.00894t) \\ \sigma_t [\text{tf}] &= 1061.8 \times 0.003027t \end{aligned} \quad (3)$$

$$f(x, t) = \alpha e^{\alpha \left(\frac{x - \mu_t - u}{\sigma_t} \right)} \exp \left(-e^{\alpha \left(\frac{x - \mu_t - u}{\sigma_t} \right)} \right) \quad (4)$$

$$\alpha = 3.677, u = -3.073$$

3.2. 重力式アンカー強度実験

重力式アンカー強度のばらつきの、浮体漂流事故への影響度を実験により検証した (Fig.3)。

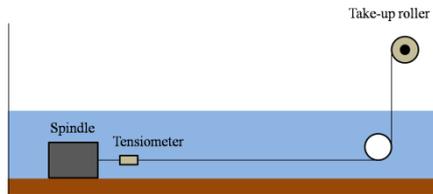


Fig.3 The experiment on the holding power of a gravity anchor

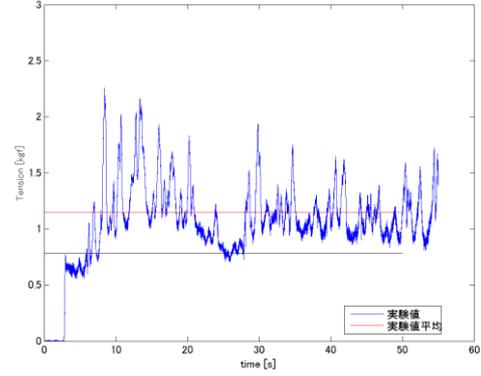


Fig.4 The result of the experiment

8 回の実験の結果から、アンカーが引き摺られ始める際の強度 (静止摩擦力) は設計強度 (Fig.4 の黒い線) を下回る確率が 28% 程度あり、その可能性は少なくないが、アンカーが動き始めた後にアンカーの前面に大量の土が溜まること等による実質の把駐力 (強度) の上昇の割合が大きいため、Spar 型風車が重力式アンカーを引き摺って漂流して行くという現象は起こる可能性は約 5% 以下と非常に低いという結論が得られた。これを踏まえて本研究では、「チェーン係留索は破断しないが重力式アンカーを引き摺ることによる浮体の漂流現象」は考慮しないこととし、浮体の漂流現象はチェーン係留索の破断によってのみ発生するとみなして WF での Spar 型風車の連鎖漂流事故リスクの算出を行った。

4. 連鎖漂流事故リスク

本研究では、浮体式風車を用いた WF での連鎖漂流事故リスク (Risk) を「供用期間 T 年での風車の漂流期待基数」とし、式(5)で定義した。

$$Risk = \sum_{m=1}^M \int_0^T \int_0^{2\pi} P_i(v, \theta, t; m) N(v, \theta, t; m) P_v(v, \theta, t) P_\theta(\theta, t) d\theta dt \quad (5)$$

式(5)の定義式をそのまま計算することは非常に困難および不可能であるため、必要に応じて簡略化することで、具体的には本研究では式(6)により Risk を算出した。

$$Risk = \sum_{t=1}^{20} \sum_{m=1}^{50} \left\{ \sum_{v=1}^{100} \sum_{\theta=1}^{360} P_i(v, \theta, t) N(\theta; m) P_v(v) P_\theta(\theta) \right\} \quad (6)$$

P_i : 初期漂流確率, N : 連鎖漂流浮体数(基),

P_v : 風速発現期待値, P_θ : 風向発現確率,

v : 10 分平均風速 (m/s), θ : 風向 ($^\circ$),

m : 浮体番号

4.1. 初期漂流確率

本研究では海象状態を決定づけるパラメータを 10 分平均風速と風向としているため、初期漂流確率はある平均風速、ある風向の風が 10 分間吹いた場合に、係留されている浮体が漂流を開始してしまう確率のことである。ここで、浮体に取り付けられた係留索 4 本のうち 1 本でも切れてしまうと浮体は漂流を開始するとみなした。

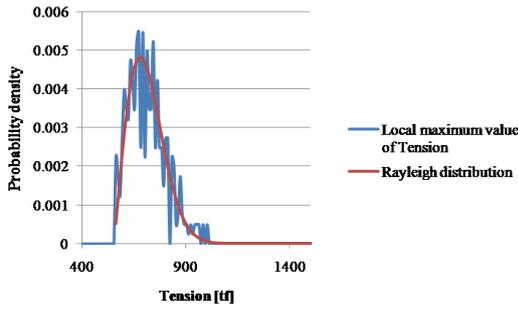


Fig.5 The frequency distribution of local maximum value of Tension

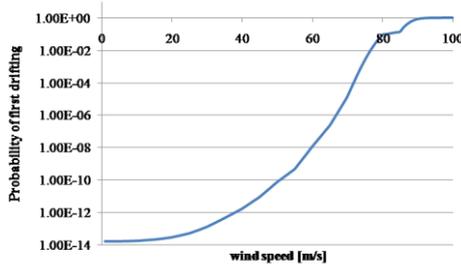


Fig.6 Probability of the first drifting in the 20th year

初期漂流確率 $P(v,t)$ は、漂流シミュレーターを用いて 10 分平均風速 v 時に係留索に発生する張力の極大値 Y の頻度分布を求め (Fig.5), その確率分布 $g(y,v)$ と、式(4)が表すチェーン係留索強度 X の $t+1$ 年目の確率分布 $f(x,t)$ を用いて、式(7)より算出する。例として 20 年目の初期漂流確率を Fig.6 に示す。

$$P(v,t) = \int_0^{\infty} \int_x^{\infty} g(y,v) f(x,t) dy dx \quad (t = 1, 2, \dots, 19)$$

$$P(v,t) = \int_{1061.8}^{\infty} g(y,v) dy \quad (t = 0) \quad (7)$$

4.2. 連鎖漂流浮体数

連鎖漂流浮体数とは、風車 1 基の初期漂流が最終的に何基の漂流事故へと発展するかという値である。これは、初期漂流風車の漂流方向に何基の健全な (未漂流の) 風車が存在するかという考え方に基いて算出し、その際に漂流浮体が係留浮体と衝突もしくは係留浮体の係留に引っ掛かった場合は連鎖漂流事故となるとみなした。想定海域の風向発現確率を考慮し、全風車、全漂流方向について平均をとると、連鎖漂流浮体数は 1.367 基であった。

4.3. 風速発現期待値

風速発現期待値とは、1 年間にある 10 分平均風速が何回発生するかという期待値である。10 分平均風速 v の発現確率分布 $f(v)$ は、低風速域は想定海域での風観測データに基づく Rayleigh 分布、高風速域は銚子での風速再現期間に基づく指数分布を適用した後、確率密度の総和が 1 となるように調整して求めた (Fig.7, 式(8))^[6]。この $f(v)$ に 1 年間における 10 分間の個数 52650 を乗じた値が風速発現期待値である。

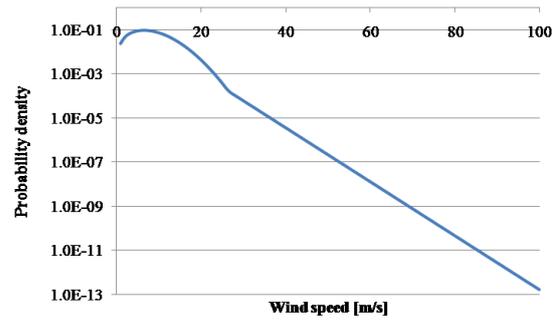


Fig.7 Probability density function of 10min average wind

$$f(v) = \begin{cases} \frac{v}{\theta^2} \exp\left(-\frac{v^2}{2\theta^2}\right) \times \frac{1}{0.99835} & (1 \leq v \leq 26) \\ \lambda \exp(-\lambda v) \times \frac{1}{0.99835} & (27 \leq v \leq 100) \end{cases} \quad (8)$$

$$\theta = 6.521, \lambda = 0.2819$$

4.4. 風向発現確率

想定海域での風観測データを基に、風向別発現確率を算出した (Fig.8)^[4]。

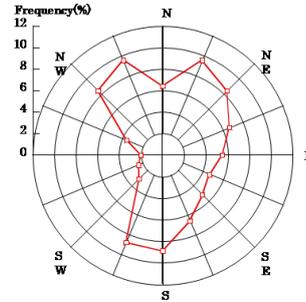


Fig.8 The frequency distribution of wind directions

4.5. リスク算出結果

以上を用いて本研究で想定する WF における連鎖漂流事故リスクを算出した結果、供用期間の 20 年間で 1.55×10^{-4} 基という結果となった。これは栗本(2008)における値 2.75×10^{-8} 基と比較すると非常に大きな値となっているが、栗本(2008)では連鎖漂流事故リスクを小さく見積もっている可能性があることを考慮すると、これは妥当な結果である。

係留系の設計安全率を 3.0 から下げた場合、および 10 年で係留索を全て新品と交換するとした場合の結果を Table.2 に示す。また、係留系の摩耗について悲観的に想定し、摩耗速度を 1.5 倍とした場合の結果を、Table.3 に示す。

Table.2 Risk of Progressive Drifting in a WF

Factor of Safety	Risk in a Wind Farm	
	Without Change of Moorings	Change of Moorings in 10 years
3.0	1.55×10^{-4}	3.03×10^{-6}
2.5	2.40×10^{-3}	1.05×10^{-4}
2.0	3.52×10^{-2}	3.30×10^{-3}
1.5	1.01×10^0	1.07×10^{-1}

Table.3 Risk in the case of terrible abrasion

Factor of Safety	Risk in a Wind Farm	
	Without Change of Moorings	Change of Moorings in 10 years
3.0	2.49×10^0	2.06×10^{-5}
2.5	8.41×10^0	3.93×10^{-4}
2.0	3.99×10^1	9.66×10^{-3}
1.5	Nearly Equal 1.0	2.65×10^{-1}

5. リスク評価

5.1. 経済性評価

1 基あたりが及ぼす連鎖漂流事故損害額の期待値と係留系設計コストの和について、安全率 3.0 の場合を基準として、安全率を変更した場合にどの程度その値が削減するかを比較する。10 年で係留索を交換した場合については、その交換コストも加えて比較を行う。浮体同士が衝突した場合は全損、ブレードのみが衝突した場合は風車部分のみ破損するとみなし、連鎖漂流事故の損害額 S は式(9)で求めた。ブレード衝突基数期待値とは、初期漂流を開始した風車が WF 上で平均して何基の風車のブレード部分のみと衝突するかという値であり、連鎖漂流浮体数と同様の方法で算出した結果 0.226 基であった。

$$S = (1 \text{基当たりの漂流確率}) \times (\text{風車コスト} + \text{浮体コスト} + \text{係留コスト} + \text{修理コスト}) + (\text{ブレード衝突基数期待値}) \times (\text{風車コスト} + \text{修理コスト}) \quad (9)$$

1 基当たりの風車コスト 2.4 億円、浮体コスト 1.6 億円、係留コストは設計安全率に応じて 1.2~2.5 億円として経済性評価を行った結果、Fig.9 となった。安全率 1.5、係留の交換は行わないのが最も経済性が高いという結果であった。摩耗速度 1.5 倍を想定した場合は Fig.10 となり、安全率 1.5 で、10 年目に係留の交換を行うのが最も経済性が高い。

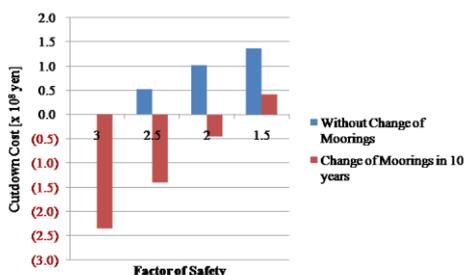


Fig.9 Cutdown cost compared to FS3.0(Factor of Safety) without change of moorings

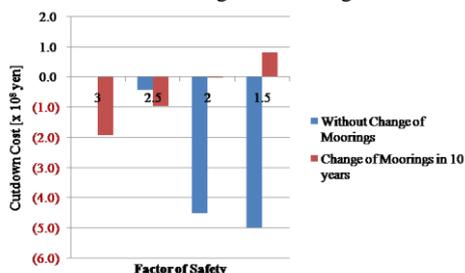


Fig.10 Cutdown cost compared to FS3.0 without change of moorings in the case of terrible abrasion

5.2. 社会受容性評価

将来的に日本で Spar 型風車を用いた洋上風力発電が実現し、さらにその規模が大きくなり多くの Spar 型風車による WF が設置されたと仮定する。その際に、幾度も風車の漂流事故が発生するような状況となってしまう場合は、洋上風力発電は危険性が高いと世間に認知され、日本での風力発電の発展の大きなブレーキとなってしまう。

そこで、経済性のみならずこういった社会受容性の観点からも、連鎖漂流事故リスクの評価を行い、最適な設計安全率について提言する。そこで、以下のことを前提条件として評価した。

- 日本の発電所の総発電容量の 10% を洋上風力発電で賄うと仮定する。
- 洋上風力発電で用いる WF は、全て本研究で想定した WF と同様のものとする。
- WF の供用期間である 20 年間における、全ての WF での連鎖漂流事故リスクの合計が 1 基未満となることを条件とする。

その結果、係留索の交換を行わない場合は安全率 2.5、10 年で交換を行う場合は安全率 2.0、係留索の摩耗速度 1.5 倍を想定した場合は安全率 2.0 強かつ 10 年で係留索を交換、とすれば十分な社会受容性を備えていると言える。

6. 結論

漂流シミュレーターの改良および係留系強度確率モデルの作成により、先行研究よりもさらに詳細に WF における Spar 型風車の連鎖漂流事故リスクの算出が可能となった。そうして算出したリスクを評価した結果、経済性と社会受容性の両方を満足させるためには、係留索の交換は行わずに係留系の設計安全率を 2.5 弱とするのが最適である。また、係留索の摩耗速度を 1.5 倍と想定した場合は、10 年で係留索の交換を行い、設計安全率は 2.0 強とするのが最適である。

今後の課題としては、より多くの、特に海洋構造物に使われている係留索の摩耗データを基に係留系強度モデルを作成することでモデルの精度が高まり、より詳細にリスクを算出することができると思われる。

参考文献

- [1] 栗本優：Spar 型浮体を用いたウインドファームの漂流シナリオに関する研究，東京大学修士論文（2008）
- [2] 社団法人日本鋼構造協会，「構造物の耐風工学」，(pp.393, 419-422)
- [3] 光易恒，「海洋波の物理」，(pp.59, 67)
- [4] <http://www.nmri.go.jp/>
- [5] <http://www.ship-doctor.com/top.html>
- [6] 中原満雄，斎藤鍊一：再現期間 50 年の年最大風速分布図について，日本建築学会論文報告集第 125 号（1966）