

浮体式洋上ウィンドファーム内での船舶衝突を考慮した風車漂流リスク評価

学籍番号 47-116653 村竹 美音
 指導教員 鈴木 英之 教授
 平林 紳一郎 講師

(2013 年 3 月修了)

Keywords: 浮体式風車, ウィンドファーム, 漂流事故リスク, 経済性評価, 社会受容性評価

1. 序論

再生可能エネルギー需要の急速な拡大や、浮体式洋上ウィンドファーム(WF)実証研究事業の始動といった背景から、浮体式洋上 WF を用いた風力発電事業の商業化に向けて予めその事故リスクを評価しておくことは重要である。数ある事故のうち、浮体式洋上 WF に固有で被害の大きな事故として、漂流を始めた浮体が別の係留浮体を巻き込み最終的に複数基が漂流する「連鎖漂流事故」がある。本研究では、強風と船舶衝突を原因とする浮体式洋上風車の連鎖漂流事故リスクについて考えていく。

2. 研究目的

本研究の目的は 2 点ある。1 点目は、浮体式洋上風車の連鎖漂流リスク評価手法の構築と経済性評価である。2 点目は、浮体式洋上風力発電事業の社会受容性の評価項目に関する検討である。

3. 研究概要

3.1 浮体式洋上風車の連鎖漂流リスク評価手法の構築と経済性評価

漂流リスク評価式として、以下の式(1)を提案する。ここで ΣN は特定条件下で漂流する風車基数、 P_w, P_s は特定条件の発現確率である。

$$\left(\begin{array}{l} \text{供用期間での} \\ \text{漂流風車数期待値} \end{array} \right) = \sum_{t=1}^T \left\{ \sum_x \sum_y \sum_i \sum_{\theta} \left(\sum_{m=1}^M N(x, y, i, \theta, v) \right) P_w(\theta, v) P_s(x, y, i) \times \text{交通量} \right\} \quad \cdots \text{式(1)}$$

本研究では、式(1)を計算する船舶-風車連鎖漂流シミュレータを開発している。シミュレータ詳細は 4.1 で述べる。シミュレータ計算結果を用いて、以下の式(2)より供用期間での漂流事故損害額を求める。

$$\left(\begin{array}{l} \text{供用期間での} \\ \text{漂流事故損害額} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{l} \text{漂流風車数期待値} \\ \times \text{風車コスト} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{l} \text{破断係留索数期待値} \\ \times \text{係留索コスト} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{l} \text{修繕コスト} \end{array} \right) \quad \cdots \text{式(2)}$$

係留索強度や風車の型・サイズ等を変えた場合のシミュレータ計算結果についても式(2)を用いて漂流事故損害額を算出し各々比較することにより、浮体式洋上 WF の経済性評価を行う。

3.2 浮体式洋上風力発電事業の社会受容性の評価項目に関する検討

浮体式洋上風力発電事業の社会受容性に関連する項目を列挙し、それらの立場別優先度を調べるため WEB アンケート調査を実施した。また、結果から風車漂流確率の重要度と限界支払意思額を算出した。

4. 船舶-風車連鎖漂流シミュレータ

本シミュレータでは、まず海象など特定条件下における漂流船舶と WF 内各風車の変位を時刻歴で計算し、各々が衝突し係留風車が漂流を始めるかを判定する。全漂流浮体が WF を完全に抜けるまでこれを繰り返し、漂流風車基数・破断係留索本数を求め、各々に条件発現確率を掛ける。別条件下においても同様に計算し、全条件での計算結果を足し合わせることで、供用期間内での漂流風車基数・破断係留索本数の期待値を算出する。漂流浮体と係留風車の衝突シナリオを Fig. 1, Fig. 2, Fig. 3 に示す。このうち、Fig. 2, Fig. 3 においては、どのような場合に係留風車の係留索が破断するのか明らかでない。そこで、係留索の破断条件を明らかにするため、次節で述べる係留索破断実験を行った。

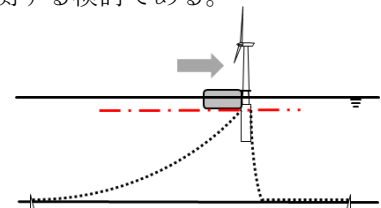


Fig. 1 Collision with a ship.

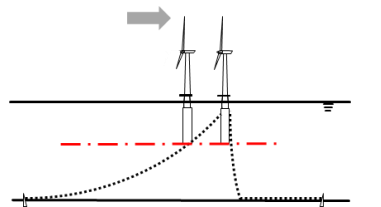


Fig. 2 Collision with floating structures of a drifting wind turbine.

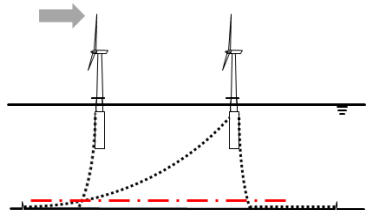


Fig. 3 Collision with mooring lines of a drifting wind turbine.

5. 係留索破断実験

漂流風車浮体と係留風車係留索の衝突、或いは漂流風車係留索と係留風車係留索の衝突時に発生する係留索張力変動を、1/40 サイズの模型を用いて計測した。衝突場所や衝突速度を変えた実験も行った。これにより衝突時の最大張力の大きさやその発生位置を明らかにし、係留索の破断張力と比較して破断条件を判断することが目的である。模型は幾何学的相似とフルードの相似則を用いて寸法・速度等を定め、実現象との対応がとれている。

結果の一部を Fig. 4, Fig. 5 に示す。浮体と係留索の衝突の場合、速度僅か 1cm/s の時でさえ、実験結果を基に試算した係留索の破断までの運動量変化量に比べ浮体運動量が 2 倍以上だったことから、係留索は必ず破断することが分かった。係留索同士の衝突の場合、張力は最大でも係留索破断張力の 0.25 倍以下という結果が得られ、係留索は破断しないことが分かった。これにより、シミュレータでは「衝突領域」を設け、衝突領域内に漂流風車が進入してきた場合に、まず何本の係留索と衝突するかを計算し、2 本の場合にのみ係留索は破断と判定することにした。

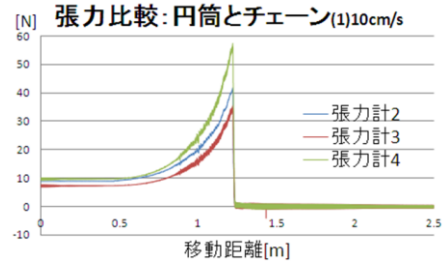


Fig. 4 Tension Change.

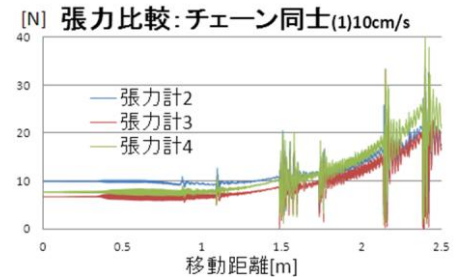


Fig. 5 Tension Change.

6. 風車漂流リスク解析

係留索の安全率 2.0, 3.0, 4.0 の各場合について、船舶-風車連鎖漂流シミュレータを用いて風車漂流基数の期待値と係留索破断本数の期待値を計算した。結果を Table 1 に示す。

本研究での計算結果は先行研究の北原^[1]の結果に比べて大きな値となっているが、北原は漂流原因を強風のみとしているのに対し、本研究では強風に加え船舶衝突も漂流原因としていることを考えると、これは妥当な結果であると言える。また、先行研究の岡山^[2]の結果と比べても、本研究での計算結果の方が大きな値となっているが、岡山の研究では着底式風車を対象としており船舶衝突後に倒壊した風車数を計算しているため、倒壊に必要なエネルギーが係留索の破断エネルギーより遥かに大きいことを考えると、これは妥当な結果であると言える。

Table 1 Numerical calculation result.

S.F.	Number of drifting wind turbines	Number of broken mooring lines
2.0	2.11	8.44
3.0	1.06×10^{-1}	4.22×10^{-1}
4.0	1.30×10^{-2}	5.20×10^{-2}

7. アンケート調査

調査目的は次の 3 点である。1 点目は、社会受容性に関わる各評価項目について、人々の立場別での重要度の違いを明らかにすることである。2 点目は、安全性・経済性・環境倫理の相対重要度や限界支払意思額を算出することである。3 点目は、資料の提示前後での回答比較により、知識の有無が回答結果へ与える影響を調べることである。これらの目的を達成するため、インターネット上で、浮体式洋上風力発電事業の社会受容性評価項目に関するアンケート調査を実施した。

設問は大きく分けて 2 種類である。1 種類目は、30 程度の評価項目の中から関心の高いものを 5 つ選んで順位付けし、魅力要素か懸念材料かを答える設問である(設問 I とする)。2 種類目は、「A. 浮体式洋上風力発電の導入率・火力発電と比較した際の CO2 削減量」「B. 家庭の月額電気料金」「C. 浮体式洋上風車の漂流確率」の 3 属性値のバランスの選好について、選択型コンジョイント形式で問う設問である(設問 II とする)。設問 II のプロフィールデザインを Table 2 に示す。また、これらの設問を一通り終了した後、浮体式洋上風力発電に関する簡単な資料を提示し、その後これまで回答した設問と全く同一の設問に再度回答する仕様になっている。

設問 I の回答結果の上位 2 つは電力供給の安定度や電気料金変化だった。資料提示前後で割合が大きく増加したものもあり、本研究に関連の深い「漂流物と風車との衝突」も含まれていた。設問 II の回答結果を基に相対重要度と限界支払意思額を算出すると、Table 3, Table 4 のようになった。設問 I, II とともに回答者の立場によって回答の傾向が異なるものが複数あり、中でも電力事業関係者の回答は他の立場の人々の回答と大きく異なっていた(Table 5, Table 6)。

Table 2 Profile design

	i	ii	iii	iv	v	vi	vii	viii
A	5% 2,000 万 t	5% 2,000 万 t	20% 8,000 万 t	10% 4,000 万 t	10% 4,000 万 t	1% 400 万 t	1% 400 万 t	1% 400 万 t
B	10,500yen	10,100yen	10,100yen	10,500yen	10,100yen	11,500yen	10,100yen	13,000yen
C	10%	1%	10%	0%	5%	10%	0%	1%
	ix	x	xi	xii	xiii	xiv	xv	xvi
A	10% 4,000 万 t	1% 400 万 t	20% 8,000 万 t	20% 8,000 万 t	5% 2,000 万 t	10% 4,000 万 t	20% 8,000 万 t	5% 2,000 万 t
B	13,000yen	10,500yen	10,500yen	13,000yen	13,000yen	11,500yen	11,500yen	11,500yen
C	10%	5%	1%	5%	0%	1%	0%	5%

Table 3 Relative importance of average.

Property	Values without references	Values with references
A	23.52	20.02
B	48.64	46.21
C	27.84	33.77

Table 5 Relative importance of electricity utility.

Property	Values without references	Values with references
A	1.78	1.10
B	62.45	53.71
C	35.77	45.19

Table 4 Marginal Willing to Pay of average.

Property	Values without references	Values with references
A	76.6 yen	68.4 yen
C	-166.7 yen	-212.8 yen

Table 6 Marginal Willing to Pay of electricity utility.

Property	Values without references	Values with references
A	-4.4 yen	3.1 yen
C	-166.1 yen	-244.0 yen

8. 連鎖漂流リスク評価

式(2)を用いて、想定 WF での風車漂流事故損害額について経済性評価を行う。各安全率の場合について、シミュレータ計算結果から求めた風車 1 基あたりの漂流確率と、式(2)から求めた漂流事故損害額と、20 年間のライフサイクルコストをまとめると、Table 7 のようになる。この結果から、係留索の安全率を上げることで抑制できる漂流事故損害額と、係留索の安全率を上げるために必要なライフサイクルコスト増額を比較すると、少なくとも安全率 2.0 以上の場合にはライフサイクルコスト増額の方が遥かに大きいことが分かる。そのため、経済的には、係留索の安全率は上げない方が良いと言える。

S.F.	Risk of drifting wind turbine	Amount of loss about accidents(billion yen)	Cost of lifecycle(billion yen)
2.0	2.11×10^{-2}	1.41	130
3.0	1.06×10^{-3}	7.37×10^{-2}	134
4.0	1.30×10^{-4}	9.57×10^{-3}	140

次に、社会受容性評価を行う。係留索安全率を 1.0 上げるために追加に必要な費用を、元の安全率の場合のライフサイクルコストで割った値を算出し、これをライフサイクルコスト増加率と呼ぶことにする。一方、安全率を 1.0 上げることに對する限界支払意思額を、基準としている家庭電気料金 10,000 円で割った値を算出し、これを許容電気料金増加率と呼ぶことにする。安全率を 3.0 から 4.0 に上げた場合のライフサイクルコスト増加率は 4.61×10^{-2} 、許容電気料金増加率は 1.97×10^{-3} となり、ライフサイクルコスト増加率の方が大きくなってしまいが、安全率を 2.0 から 3.0 に上げた場合にはライフサイクルコスト増加率が 2.98×10^{-2} 、許容電気料金増加率が 4.27×10^{-2} となり、許容電気料金増加率の方が大きくなった。

以上により、経済的な観点だけで見れば安全率は低い方が経済性は良かったが、社会的な観点で見れば、安全率を 2.0 から 3.0 に上げることは受容されるということが分かった。

9. 結論

9.1 研究成果

(1) 風車の連鎖漂流リスク評価手法の構築

浮体式洋上 WF 内での船舶衝突を考慮した風車漂流リスク評価式を提案し、これを計算するシミュレータを開発した。「船舶衝突」を漂流原因の一つとして取り入れた計算が可能となった。

(2) 風車同士の衝突時における係留索破断条件の明確化

係留索破断実験により、風車係留索同士の衝突では係留索は破断せず、漂流風車浮体部と係留風車の衝突の場合にのみ係留風車係留索は必ず破断するということが明らかになった。

(3) 浮体式洋上風力発電事業に対する人々の立場別関心事の明確化

浮体式洋上風力発電事業の社会受容性に関わる評価項目について WEB アンケート調査を実施し、人々の立場によって重視度が大きく変わる項目が多数存在することを確認した。情報の有無により、浮体式洋上風力発電事業に対する人々のイメージが大きく変化し得ることも分かった。

(4) 風車漂流リスクの相対重要度と限界支払意思額の算出

「浮体式洋上風力発電導入率と CO2 削減量」「電気料金」「漂流確率」の 3 属性の相対重要度は順に 2.5:3 程度の割合であることが分かった。浮体式洋上風力発電導入率を 1% 上げることに對する支払意思額は 80 円前後、漂流確率を 1% 下げることに對する支払意思額は 200 円前後であることが分かった。

(5) 風車の連鎖漂流事故に対する経済的・社会的リスク評価

シミュレータ計算結果から求めた事故損害額と、ライフサイクルコストと、アンケート結果から求めた漂流確率に対する限界支払意思額とを比較し、経済的には安全率を上げるべきではないが、社会的には安全率を 2.0 から 3.0 へ上げることは十分に受容されるという結果になった。

9.2 今後の課題

(1) 船舶-風車連鎖漂流シミュレータの精度向上

船舶-風車連鎖漂流シミュレータの開発により、想定 WF での特定条件下における漂流リスクを計算することは可能となったが、本研究で考慮している条件数は船舶形状 3 種、船舶漂流開始場所 20 点、風向 8 方向、風速 4 種と少なく、実海域での極めて複雑な環境下での漂流リスクを精度良く求めるには条件をより細かくするなどシミュレータを改良する必要がある。

(2) より実現に近い形での係留索破断条件の検討

本研究の係留索破断実験では、衝突する側の物体は一定距離進むまで姿勢を維持したまま定速で移動させた。しかし、実際には衝突と同時に減速し、傾斜する可能性も考えられる。そのため、より精密な係留索破断条件を求めるには、衝突物体を強制移動させることなく実現に近い状態で衝突させる必要がある。

(3) 様々な条件下での漂流リスク・ライフサイクルコスト比較

本研究では 2.5MW スパー型風車 100 基からなる 9km 四方の正方形の WF を想定して計算を行ったが、風車の出力や型、風車間距離、WF 規模や形状などを変化させた場合の計算も同様に行うことで、各々の漂流リスクやライフサイクルコストを比較し、想定海域の条件に最適な WF を提案できるようになる。

参考文献

- [1] 北原悠：修士論文，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，東京大学(2010)
- [2] 岡山真也：修士論文，漂流船舶が着床式洋上ウインドファームに及ぼすリスクに関する研究，東京大学(2011)
- [3] 網川響吾：卒業論文，CCS の国際的社會受容性に関する調査研究，東京大学(2010)
- [4] 日本海事協会，鋼船規則 L 編(2009) 7-20
- [5] 藤原敏文，上野道雄，二村正，船体に働く風圧力の推定，日本造船学会論文集 第 183 号(1998) pp. 77-90
- [6] 海洋技術安全研究所，詳細版日本近海の波と風データベース，http://www.nmri.go.jp/wwjapan/namikaze_main.html
- [7] J-DOSS，海洋データ・情報の閲覧・提供サービス，http://www.jodc.go.jp/service_j.htm 他