

我が国における洋上風力発電設備支持構造物の防食工法の検討

中島 一朗*・辰巳 大介**・田所 篤博***・吉田 倫夫****・小林 厚史****・川瀬 義行****

* (一財) 沿岸技術研究センター 洋上風力研究室 主任研究員

** 前 (一財) 沿岸技術研究センター 研究主幹

*** (一財) 沿岸技術研究センター 業務執行理事

**** 電気防食工業会((株)ナカポーテック・日本防蝕工業(株)・日鉄防食(株))

洋上風力発電設備支持構造物の防食の設計と維持管理について、技術の現状と課題を関係者間で共有するため、沿岸技術研究センターは2020年11月から電気防食工業会と共同で、先行する海外の設置事例や技術的知見、また国内の港内における設置事例等をふまえ、通常の港湾鋼構造物と異なる留意事項や参考となる技術情報を体系的に整理することを目的とした研究を進めている。本稿では、この共同研究成果の一部を報告する。

キーワード：洋上風力発電，支持構造物，防食技術

1. はじめに

2050年カーボンニュートラルの実現に向け、国内における洋上風力発電の導入が加速化している。洋上風力発電設備支持構造物の設計や審査の観点においても、発電事業者の負担軽減や審査期間の短縮等のため各種技術的知見の確立が求められている。

国土交通省と経済産業省は港湾法と電気事業法に基づく審査手続きの合理化を図るため、2018年3月に「洋上風力発電設備に関する技術基準の統一解説」¹⁾(以下、統一解説という。)を策定・公表し、2020年3月には再エネ海域利用法の施行にともないそれを改定している。また、2021年4月からは、洋上風力発電設備支持構造物に対する電気事業法のウインドファーム認証と港湾法の適合性確認の合同審査も開始されている。しかしながら、港外に大規模な洋上風力発電設備を建設した事例が国内にはほとんどないことから、支持構造物を対象とした腐食対策に関しても指針づくりが急がれている。

洋上風力発電設備支持構造物の防食の設計と維持管理について、技術の現状と課題を関係者間で共有するため、沿岸技術研究センターは2020年11月から電気防食工業会と共同で、先行する海外の設置事例や技術的知見、また国内の港内における設置事例等をふまえ、通常の港湾鋼構造物と異なる留意事項や参考となる技術情報を体系的に整理することを目的とした研究を進めている。本稿では、この共同研究成果の一部を報告する。

なお、統一解説では、タワー、下部構造、基礎を総称して支持構造物としているが、本稿では下部構造と基礎を対象とし、タワーは含まないことに留意されたい。

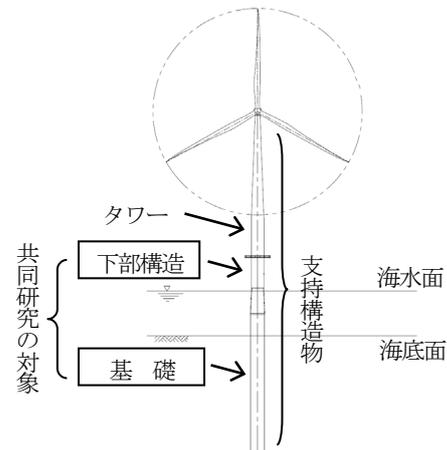


図-1 洋上風力発電設備支持構造物

2. 課題認識

共同研究では、洋上風力発電設備支持構造物と国内における港湾の鋼構造物との構造や設置環境の相違をふまえて、海外の知見の導入の観点から、防食上の主な課題を以下のとおり整理した。

- ・外洋の厳しい環境（波浪・潮流）
- ・内面の複雑な腐食メカニズム
- ・海洋生物の影響
- ・漂砂、洗掘による摩耗や埋設部の変化
- ・限定された供用期間（腐食しるを考慮）
- ・海外規格、基準との整合
- ・効率的なメンテナンス手法

共同研究では、これらの課題に対して、国内外の技術基準等とともに国内を主体に海洋構造物の防食実績、海洋暴露試験の成果などから技術的な知見を収集し、その内容をレビューした。

本稿では、主な課題の中から、「外洋の厳しい環境」、「内面の複雑な腐食メカニズム」、「腐食しるを考慮」、「海外規格、基準との整合」を取り上げる。

3. 技術的知見のレビュー

3.1 外洋の厳しい環境

統一的解説では、洋上風力発電設備には、海水や雨水による金属の腐食や漂砂の移動等による構造表面の摩耗等を防止するため、適切な措置を講ずることが求められている。また、洋上風力発電設備では自然状況等の諸条件に応じて、金属の腐食およびその腐食速度を適切に考慮するものとし、防食設計においては環境条件、耐用年数、経済性、施工性等を考慮して、適切な防食工法を選定することとなっている。

港湾区域内の港湾鋼構造物に関しては、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」²⁾（以下、港湾基準という。）や「港湾鋼構造物防食・補修マニュアル」³⁾（以下、防食・補修マニュアルという。）により、防食に関する技術基準等が既に確立しているが、洋上風力発電設備は、港湾区域に限らず一般海域への設置も想定される。一般海域では、沿岸部の港湾区域とは異なり沖合部、外洋の厳しい海象・気象条件にさらされることから、防食およびその維持管理においても対応が求められる。

共同研究では、一般海域にも適用できる技術的な知見の収集を試みた。ここでは、電気防食の設計における防食電流密度に関してその結果を述べる。

防食電流密度とは、鋼構造物を電気防食するとき、その電位を防食電位より卑（マイナス側）になるように分極するために要する単位面積あたりの電流である。港湾鋼構造物でよく用いられる流電陽極方式の電気防食の設計においては、防食電流密度を基に必要な陽極電量を算出している。

港湾基準や防食・補修マニュアルでは、防食電流密度が海域環境によって大きく変動するため、適切な値を設定することになっており、塩化物イオン濃度、溶存酸素濃度、アンモニウムイオン濃度により汚染海域と清浄海域に区分した、初期防食電流密度の標準値が規定されている。

表-1 港湾施設の初期防食電流密度³⁾ (mA/m²)

環境	海水中	海底土中部
清浄海域	100	20
汚染海域	130~150	26~30

また、防食・補修マニュアルでは、水温との関係から環境を区分し防食電流密度を規定している NACE (National Association of Corrosion Engineers: 防食技術者協会 [本部: 米国]) や DNVGL (Det Norske Veritas Germanischer Lloyd: ノルウェー・ドイツ船級協会) の規格を海外の事例として紹介している。さらに、一般海域で懸念されるような波浪や潮流の影響につい

ては、ISO (International Organization for Standardization: 国際標準化機構) 規格等や建設省土木研究所、(独) 港湾空港技術研究所における試験結果等を引用し、腐食環境が厳しくなるため大きい防食電流密度が必要なることが解説されている。

今後、洋上風力発電設備の支持構造物向けに一般海域を含めた防食電流密度の標準値などを設定していくには、建設予定海域における仮通電試験や水質調査などの成果と防食効果の検証が不可欠であるが、防食・補修マニュアルでも引用されている土木研究所の研究成果は、国内の港外におけるデータとして大きな示唆を与えられる。

1991年3月に土木研究所が(財)土木研究センターとの共同研究成果としてとりまとめた「海域における土木鋼構造物の電気防食指針(案)・同解説」では、外洋性海域の防食電流密度を内湾性海域の標準値に対して波浪影響を考慮した係数 F (1.0~1.5) を乗じて設定することとしている。これは駿河湾で行った自然流電試験の結果から、内湾に比べて常に波浪がある場所では、波の影響によって分極がしにくいことが確認され、初期に十分な電流密度が与えられないと満足する防食効果得られないためとしている。

表-2 一般海域の初期防食電流密度⁴⁾ (mA/m²)

環境		海水中	土中
一般海域	内湾性	100	20
	外洋性	100×F	20×F
備考	Fは、海域の波浪、潮流の程度に応じて1.0~1.5までの範囲とする。		

また、潮流の影響については、室内試験と鳴門海峡での実海域試験の結果から、潮流速に対する防食電流密度の標準値を規定している。

表-3 特殊海域の初期防食電流密度⁴⁾ (mA/m²)

環境		海水中	
特殊海域	潮流	1 m/s	160
		2 m/s	230
		3 m/s	270

3.2 内面の複雑な腐食メカニズム

港湾基準では鋼材の腐食速度について、鋼管杭の内面のように密閉された空間においては、酸素の供給が遮断されることから腐食はないものと考えてよい、と解説されている。防食・補修マニュアルにおいても港湾鋼構造物の腐食環境区分において、鋼管杭の内面は、酸素や水の移動や供給のない閉鎖系となるため、鋼材の腐食速度は小さく、格別の設計上の配慮を必要としないことがその使用実績からも明らかである、と解説されている。また、NACE や ISO の海外規格においても密閉空間の腐食に関して同様の記述がみられる^{8),9)}。

洋上風力発電設備支持構造物のうち、ジャケット構造の部材内面は鋼管杭内面と同じ閉鎖系の環境と見なせ

るので、防食は不要と考えられる。これに対してモノパイル構造は、ケーブルルートを確認するための開口部が存在する可能性があるとともに、運転や維持管理のため内部にアクセスすることも想定される。このため、完全な閉鎖系と見直すことは困難である。

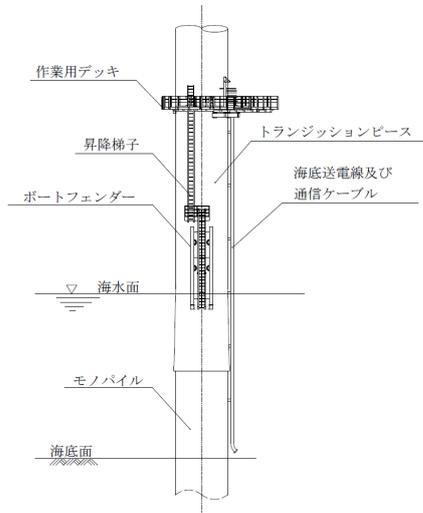


図-2 運転や維持管理に必要な設備¹⁾

DNVGL では、こうしたモノパイル内面の環境をふまえて、水中部内面は被覆防食、電気防食、腐食しろまたはその組合せによって保護すべきと規定している⁶⁾。

しかしながら、先行する欧州においてもモノパイル内面の防食仕様は必ずしも確立されておらず、電気防食によって発生するおそれのある塩素、水素ガスの影響や土壌によっては嫌気性バクテリアの影響なども考慮する必要がある。今後実績を積み上げることで、国内の設置環境に適したモノパイル内面の防食仕様の標準化が望まれる。

3.3 腐食しろを考慮

洋上風力発電設備の法定海域占有期間は最長30年となっており、この期間の腐食をある程度許容した腐食しろを考慮することによって、ライフサイクルコストの低減につながるケースが想定される。

統一的解説では、防食工法の選定に関する基本的な考え方として、供用期間の短い部材には防食工法は適用せず、腐食しろによって腐食対策を図ってもよいとされている。しかしながら、港湾基準や防食・補修マニュアルでは、過去の事故事例や原則50年以上の耐用年数の観点から仮設構造物を除き腐食しろは適用しないこととなっている。

洋上風力発電設備の支持構造物においても、腐食速度が比較的小さい場合を除き、腐食しろのみで主要部材の腐食対策を行うことは現実的ではない。被覆防食や電気防食と併用することで、防食法の耐用年数以降の期間や施工などの都合で無防食となる期間を腐食しろで補うことができれば、全体としてリーズナブルなコストを実現できる可能性がある。ただ、腐食速度が

速く、変動の大きな集中腐食、摩耗作用（サンドエロージョン・コロージョン）、微生物腐食などが懸念される箇所ではそれに応じた適切な防食法を選定すべきである。

腐食しろの設計では、適用される環境での腐食速度の評価が必要である。

港湾基準や防食・補修マニュアルでは、既設の港湾鋼構造物の調査結果等を基に、局部腐食を除く平均的な全面腐食速度として、港湾における鋼材の腐食速度の標準値を示している。

表-4 港湾における鋼材の腐食速度の標準値³⁾

腐食環境	腐食速度 (mm/y)
H. W. L. 以上	0.3
H. W. L. ~L. W. L. -1.0m	0.1~0.3
海水中	0.1~0.2
海底土中部	0.03

また、DNVGL では洋上風力発電設備向けに気候区分（表面海水温）ごとに、飛沫帯における主要構造部の設計腐食速度の最小値を提示している。ここでは、年間平均の表面海水温が12℃以下の場合、外面の腐食速度の最小値は0.30mm/yとしている⁶⁾。

腐食しろの設計に当たっては、こうした基準の腐食速度を参照できるが、腐食速度は波浪、潮流、海水成分などの設置環境に大きく依存するため、国内の洋上風力発電設備の設置環境に合わせた腐食速度の標準値の設定が望まれる。

港湾鋼構造物以外の国内における海洋構造物の事例として、ある固定式海上作業台では、飛沫帯の塗装部に腐食速度を0.25mm/yとして算出した腐食しろが設けられていた。さらに、海中部の電気防食部では、電気防食後の腐食速度を0.15mm/yとして腐食しろを設定していた⁵⁾。

しかしながら、国内の沖合部における腐食速度の調査データは乏しく、今後洋上風力発電設備の設置実績に応じて標準値を設定し、アップデートしていく必要がある。

3.4 海外規格、基準との整合

我が国では、港外に大規模な洋上風力発電設備を建設した事例はほとんどないが、海外では欧州を中心に洋上風力発電の導入が進んでおり、技術規格等も広く整備されつつある。今後、我が国においても洋上風力発電を広く普及させるためには、こうした海外の技術的知見を積極的に取り入れ、必要に応じて国内外の技術基準等の整合化を図るべきである。

電気防食の陽極に発生する防食電流は、図-3 に示すように初期に大きな値を示し、防食期間の経過とともに低減して定常値に達する。そして最終段階では寿命とともに防食電流も尽きることとなる。

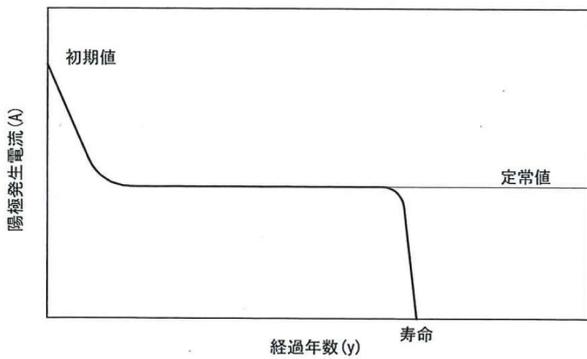


図-3 陽極発生電流の経時変化模擬図³⁾

図-4 に、流電陽極方式の電気防食について、国内外の基準に基づく設計手順を示す。

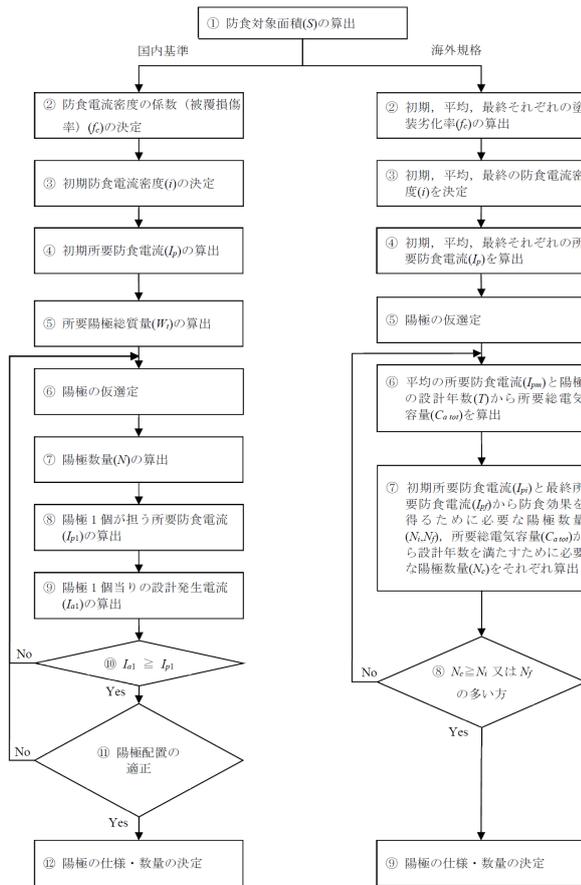


図-4 流電陽極方式の設計手順

国内基準として港湾基準や防食・補修マニュアルによる設計手順では、初期防食電流密度と防食期間に応じた電流低減率により平均防食電流を算出して陽極の寿命を評価しており、防食期間の最終段階で残存する防食電流には特に言及していない^{2),3)}。

一方、DNVGLなどの海外規格では、初期、平均、最終に防食期間を区分して防食電流密度が規定されており、初期、平均に加えて最終段階でも規定値を満足することが求められている^{6),7),8),9)}。

共同研究では、国内外の基準等に基づきモノパイル構造の外面上について流電陽極方式による電気防食の試設計を行い比較したが、海外規格等の方が国内基準に比べ

て必要な陽極数量が多く算出された。各基準にはそれぞれ背景や思想があり、一概に適否を判断できるものではないが、この結果には留意する必要がある。また、いたずらに各基準等の規定を混同して使用することは避けるべきで、可能な限り統一感をもった合理的な基準等の適用が望まれる。

4. おわりに

共同研究では、洋上風力発電設備の支持構造物に関する防食技術の現状と課題を関係者で共有するため、国内外の設置事例や技術的知見の収集を試みた。しかしながら、国内の設置事例がまだ少なく、特に沖合部や外洋における基礎的な技術データが乏しいことをあらためて認識させられた。今後、マニュアルや技術基準を整備し、洋上風力発電設備支持構造物の防食技術を確立していくためには、設置実績に合わせてこうした技術データを集約して蓄積できるしくみや制度の構築が望まれる。

なお、今回の共同研究の成果は、テクニカルレポートとして取りまとめ、公開する予定である。

謝辞

本稿は、電気防食工業会との共同研究成果の一部をまとめたものである。

共同研究にあたっては、洋上風力発電設備支持構造物の防食工法に関する研究会(委員長 清宮早稲田大学名誉教授)の各委員、電気防食工業会の関係者から貴重なご意見、ご指導をいただきました。ここに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 洋上風力発電施設検討委員会：洋上風力発電設備に関する技術基準の統一的解説(令和2年3月版), 2020
- 2) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説, 2018
- 3) 沿岸技術研究センター：港湾鋼構造物防食・補修マニュアル(2009年版), 2009
- 4) 建設省土木研究所, 土木研究センター：海域における土木鋼構造物の電気防食指針(案)・同解説, 共同研究報告書第58号, 1991
- 5) 鋼材倶楽部：海洋構造物防食施工指針, 1976
- 6) Det Norske Veritas Germanischer Lloyd : DNVGL-RP-0416 Corrosion protection for wind turbines, 2016
- 7) Det Norske Veritas Germanischer Lloyd : DNVGL-RP-B401 Cathodic protection design, 2017
- 8) NACE International : SP0176-2007, Corrosion Control of Submerged Areas of Permanently Installed Steel Offshore Structures Associated with Petroleum Production, 2007
- 9) International Standard : N468 ISO/DTR 23487-2, Metallic and other inorganic coatings - Corrosion protection of offshore wind turbines - Part 2: Corrosion protection of foundation structures, 2018