

技術論文

# 日本製鉄グループの“洋上風力ソリューション”に向けた取組

## Activities by Nippon Steel Corporation and Group Companies for Offshore Wind Solutions

川田 裕之* Hiroyuki KAWATA	本間 竜一 Ryuichi HOMMA	加茂 孝浩 Takahiro KAMO
米澤 隆行 Takayuki YONEZAWA	金子 道郎 Michio KANEKO	久積 和正 Kazumasa HISAZUMI
小杉 知佳 Chika KOSUGI	奥島 基裕 Motohiro OKUSHIMA	武川 啓之 Hiroyuki TAKEKAWA

### 抄 録

洋上風力発電は国内に大きな導入ポテンシャルを有する再生可能エネルギーである。洋上風力発電は、発電機、基礎構造のみならず、その設置、維持管理、運用や送電、電気利用まで、幅広い産業であり、鉄鋼業は様々な面からそこに寄与する。日本製鉄(株)および日本製鉄グループ各社は、着床式および浮体式洋上風力発電設備の実証研究事業を通じて得た技術と、船舶や土木・建築等の異分野で確立した技術とを活用し、同分野の発展に寄与することができる。本稿では“洋上風力ソリューション”と題し、日本製鉄および日本製鉄グループの有する洋上風力発電に関する技術群から、鋼材、高生産性に寄与する大入熱溶接技術、係留システム、ライフサイクルコスト(LCC)改善技術(疲労、耐食)、そして環境影響について、概観する。

### Abstract

**Offshore wind power is expected to be a major renewable energy source in Japan. Offshore wind power is used in a wide range of industries, i.e. turbine, foundation structure, float, installation, operation & maintenance (O&M), power transmission, and the use of electricity. The steel industry will be able to contribute to offshore wind power in many ways. Nippon Steel Corporation and Nippon Steel group can contribute to offshore wind power with technologies acquired through demonstration research projects, and technologies established in different fields, such as maritime and civil engineering. In this manuscript, we present the technical activities conducted by Nippon Steel and Group Companies to provide solutions for offshore wind power.**

## 1. 洋上風力発電と鉄鋼業の関わり

現代社会を支える化石燃料(石油、石炭、天然ガス等)は極めて扱いやすいエネルギー集積体であるが、一方で自然環境下でのその生成には超長時間を要し、事実上回復可能性の無い資源である。多数の天変地異に見舞われた人類の歴史を鑑みたとき、将来を見据えて化石燃料はなるべく温存し、未永く利用することが好ましい<sup>1)</sup>。特に、化石燃料の埋蔵量に乏しい日本では、エネルギーセキュリティの観点<sup>2)</sup>からも、エネルギー源の化石燃料依存からの脱却を進めることが望まれており、いわゆる“再生可能エネルギー”によるエネルギー自給率の向上が急務である<sup>3)</sup>。

化石燃料の使用量削減にはその主要用途である発電の代

替手段が問題となる。再生可能エネルギーのうち、日本において主要電源となりうるポテンシャルを持つのは太陽光と風力である<sup>4)</sup>。このうち、太陽光発電は、すでに日本国内での発電量(2022年)<sup>4)</sup>に占める割合として9.9%に達しており、発電量は106TWhと世界屈指の規模である。一方の風力発電の同年の実績は0.9%、9TWhに過ぎず、風力を主要な電源とする国々<sup>5,6)</sup>と比べても開発余地が極めて大きい。ゆえに風力は“再生可能エネルギー主力電源化の切り札”<sup>7)</sup>と呼ばれる。風力発電は設置場所によって大きく陸上と洋上に分けられる。日本では陸上での風力発電適地が限られ、かつ発電機を多数設置するには大規模な森林開発が必要となるなど課題が多い。よって“洋上風力発電”の開発が、新たな主力電源になりうる再生可能エネルギー

\* 鉄鋼研究所 高韧性鋼材研究部 高機能化研究室 上席主幹研究員 博士(工学) 千葉県富津市新富 20-1 〒293-8511

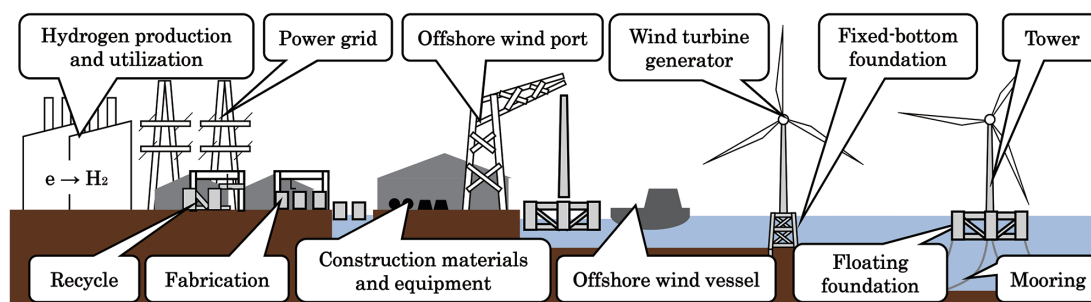


図1 洋上風力発電および周辺において鉄鋼業が寄与する主な領域  
Overview of offshore wind power considering the contribution of the steel industry

として、日本での産業の立上げが進んでいる<sup>7)</sup>。

鉄鋼材料は構造材料として、また機能材料として、様々な領域において幅広く大量に使用されている。図1に洋上風力発電およびその周辺領域における鉄鋼業の役割を示す。風力発電は巨大な風車により発電を行うが、それを支えるために鋼製の頑強な構造体が必要となる。特に洋上においては、海上輸送のメリットも活かして風車の大型化が現在も進む一方、風車そのものを支えるタワーに加えてモノパイルやジャケットといった着床式基礎<sup>8)</sup>、あるいはセミサブ等の浮体式基礎<sup>9)</sup>も必要となり、多量の鋼材が用いられる。例えば、定格10MW風車の場合、タワーとセミサブ型浮体とで1基あたり4000トン程度の鋼材が必要と推定される<sup>10)</sup>。加えて、タワーと基礎部をつなぐトランジションピースや、浮体の場合には係留に用いるチェーン<sup>11)</sup>も鋼製である。また、これらの鋼構造が支える風車には長期の回転に耐えるベアリング（軸受）や歯車類が用いられる<sup>12)</sup>。（着床式基礎構造については本誌別記事<sup>13)</sup>にて詳述する。）

風車および基礎の設置・運用は、基地港<sup>14)</sup>を中心に、SEP船やSOVなどの船舶<sup>15)</sup>を活用して行われる。鉄鋼材料は、これらの港湾設備および港湾そのもの<sup>16,17)</sup>、船舶<sup>18)</sup>、そして港湾での作業に用いる架台などの建設資材や機材<sup>19)</sup>として活用される。また、このようなタワーや基礎部について、製造設備のみならず、溶接などの製造工程に関する知見も、鉄鋼業には多数の蓄積がある。

更に、洋上風力発電の周辺領域との関係として、例えば鉄塔などによる送配電設備への寄与<sup>17)</sup>、優れたリサイクル性<sup>20)</sup>を活かした使用済み基礎部の資源化、そして、ピーク発電量を活かして製造される水素の生産・運搬設備への適用や製造された水素の製鉄への利用<sup>21)</sup>などが考えられる。以上の通り、鉄鋼材料は洋上風力発電における発電設備そのもの（風車+基礎）に加え、その設置・運用から発電した電気の利活用まで、事業の全長にわたって関与する素材であり、今後の日本での洋上風力発電市場の確立に当たって互恵的な関係を確立することが望まれる。

## 2. 洋上風力発電と日本製鉄グループの関わり

日本製鉄グループと風力発電の本格的な関わりは、20世

紀末にデンマークからタワー製作を受注したことに始まる<sup>22)</sup>。国内における陸上風車導入の黎明期である2003年には北九州市若松区響灘北緑地において、1.5MW発電機10基で構成される風力発電事業（現：(株)エヌエスウインドパワーひびき）を開始した。その後、洋上風力発電の本格的な導入に向け、2011年からは“洋上風力発電システム実証研究（北九州沖）”<sup>23)</sup>および“浮体式洋上ウインドファーム実証研究事業（福島県沖）”<sup>24)</sup>に取り組んだ。そこでは、着床式基礎の詳細設計を行い、日本の自然条件に即したジャケット構造を提案し<sup>25)</sup>、また、後者においてはセミサブ型浮体への高強度鋼の適用および周辺技術<sup>26)</sup>やチェーンによる係留<sup>27)</sup>に関する検討を進めた。併せて、これら技術開発と並行し、国内外の洋上風力設備に対して鋼材、鋼構造を供給してきた。

洋上風力発電の日本での主電源化に向け、2040年代に30～45GWの発電能力を整備することを目標とし、足元は着床式の発電設備から設置し、2030年ごろから浮体式の商用設置が始まる予定である<sup>28)</sup>。凄まじい規模感、速度感での洋上風力発電産業の急拡大となるが、鉄鋼業界もこれまでに同分野において開発した技術と、船舶や土木・建築等の異分野で確立した技術とを活用し、産業の確立・拡大を合理的に進め、社会を支える新たな柱となるエネルギーの立上げに寄与していきたい。そのためには、単純な材料供給に留まらず、関連する知見・技術まで活かし、材料-工法-構造を有機的に連携させた技術提案が求められると考える。

本稿では“洋上風力ソリューション”と題し、日本製鉄(株)および日本製鉄グループの有する洋上風力発電に関する技術群（表1）を概観する。

## 3. 鋼材による貢献

### 3.1 洋上風力発電用鋼材（厚板）

洋上風力発電設備は強風に晒され、過酷な気象、海象条件の下で20年以上の長期にわたり安定して稼働することが求められる。また、特に日本では地震、台風、津波などの自然災害に対して安定性を確保することも必要である。そのため、その構造を構成するタワーおよび基礎には高品

表 1 洋上風力発電および周辺に寄与する主な日本製鉄グループ技術群  
The contribution of the Nippon Steel group's steel technology to the offshore wind power system

Wind farm	Wind turbine generator	Electrical steel sheet, Shaft, Bearing, Gear
	Tower	Steel plate (high strength), Flange, Bolt and nut
	Fixed and floating foundations, Transition piece	Steel plate (high strength, corrosion-resistant), High corrosion resistant materials (SUS, Titanium), PC steel wire, Bolts and nuts, Pipe and tube, Jacket structure, UIT (Peening)
	Mooring, Submarine cable	Chain, Cable, Anchor, Mooring system, Pipe and tube, Foundry pig iron
Port, Fabrication	Vessel	Steel plate (high strength, corrosion-resistant)
	Port	Steel sheet pile, Steel pipe pile, Coating, Steel slag
	Construction materials and equipment	Steel sheet, Steel plate, Bar and rod, Wire rope, Pipe and tube, Steel sheet pile, Steel pipe pile, Steel slag
	Fabrication	Welding technology, Welding consumable
Related field	Power grid	Transmission tower, Steel pipe pile, Overhead conductor, Electrical steel sheet
	Recycle	Steel scrap recycle
	Hydrogen production and utilization	Low-temperature steel plate, Pipe and tube, Electrical steel sheet, Hydrogen reduction steel making

質な鋼材が大量に必要となる<sup>10, 29)</sup>。

モノパイル、ジャケットといった着床式洋上風車の場合、日本では経済産業省と国土交通省が策定する“洋上風力発電設備に関する技術基準の統一的解説”<sup>9)</sup>に準拠した設計となり、鋼材は建築基準法に準拠した JIS 規格材あるいは国土交通大臣認定を受けた材料が用いられる。

一方、浮体式洋上風車の場合、電気事業法、港湾法、船舶安全法が適用され、同法に基づき国土交通省が策定した“浮体式洋上風力発電施設技術基準”<sup>9)</sup>に準拠して設計される。鋼材は船舶構造規則(平成10年運輸省令第16号)に規定する材料を用いることになり、例えば、日本海事協会(NK)鋼船規則 K 編船体用圧延鋼材が用いられる。

先行して設置が進む着床式基礎には主に引張強度 50 キロ級の鋼材が用いられ、板厚は一般的な船舶向け材よりも厚く、海洋構造物や高層建築向けと同等以上の厚手材が多く用いられる。特にモノパイルでは板厚 100mm 超の極厚鋼材が適用される場合もある。一般的に、板厚が厚い鋼材ほど高い清浄度や内質の確保が求められ、このような鋼材を大量かつ安定して供給するには高い製造技術と厳格な品

質管理とが必要となる。表 2 に、着床式基礎に適用可能な溶接構造用圧延鋼材の例として、SM490C、SM520C の化学組成と機械的特性の規格値<sup>30)</sup>を示す。これらの耐力は板厚が厚くなるほど低下し、例えば SM520C では板厚 75～100 mm で 325 MPa 以上となる。最大引張強さは板厚によって変化しない。

これらには炭素当量の制限はないが、熱処理ではなく熱加工制御により製造される場合はその上限が規定される。日本では 1980 年代から、世界に先駆けて、主に制御圧延(Controlled Rolling)と加速冷却(Accelerated Cooling)とを組み合わせた TMCP (Thermo Mechanical Control Process) 製造プロセスを実用化し、改善してきた<sup>31)</sup>。同プロセスにより製造する鋼板は焼きならしや古典的制御圧延プロセスによる製品と比べて極めて微細な金属組織が得られ、同一成分、すなわち同炭素当量で 100 MPa 程度強度を高めることができる。TMCP 鋼では、この強度上昇を炭素当量削減に活かすことで、高強度でありながら炭素当量が低く、よって溶接部硬さが低減され、溶接性が飛躍的に高まった(図 2)<sup>32)</sup>。

表 2 洋上風力発電に適用可能な溶接構造用圧延鋼材(板厚 100mm 以下)<sup>29)</sup>  
Typical heavy plate steel for fixed-bottom offshore wind steel structure<sup>29)</sup>

	Chemical composition (mass%) <sup>a)</sup>						
	C	Si	Mn	P	S	C <sub>eq</sub> <sup>b)</sup>	P <sub>CM</sub> <sup>b)</sup>
SM490C	≦ 0.18	≦ 0.55	≦ 1.65	≦ 0.035	≦ 0.035	( ≦ 0.40) <sup>c)</sup>	( ≦ 0.26) <sup>c)</sup>
SM520C	≦ 0.20	≦ 0.55	≦ 1.65	≦ 0.035	≦ 0.035	( ≦ 0.42) <sup>c)</sup>	( ≦ 0.27) <sup>c)</sup>

	Mechanical properties			
	Yield point or proof stress (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Charpy impact energy (J)
SM490C	≧ 295 <sup>c)</sup>	490–610	≧ 21 <sup>d)</sup>	≧ 47 (0°C) <sup>e)</sup>
SM520C	≧ 325 <sup>c)</sup>	520–640	≧ 21 <sup>d)</sup>	≧ 47 (0°C) <sup>e)</sup>

c) Thickness: 75–100 mm, d) Thickness > 40 mm, e) Rolling direction



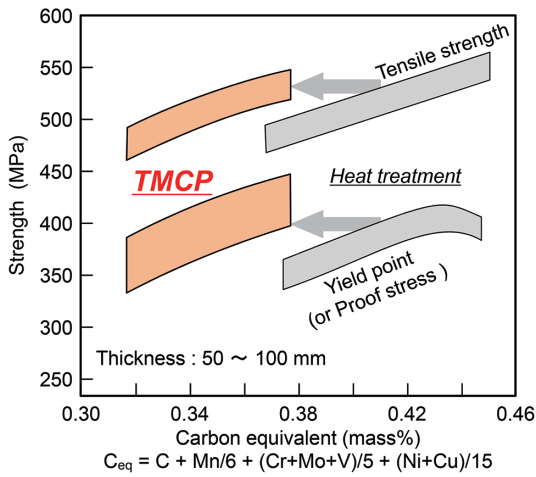


図2 TMCP鋼と熱処理鋼の強度と炭素当量の比較<sup>32)</sup>  
Improving strength-weldability balance with TMCP<sup>32)</sup>

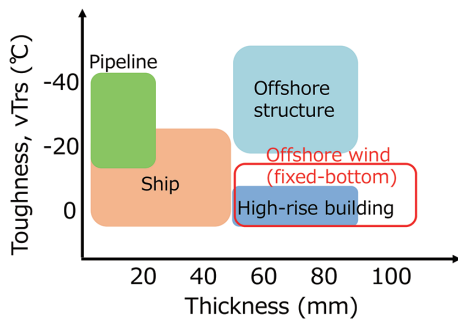


図3 各産業分野で用いられる鋼材の板厚と低温靱性仕様<sup>27)</sup>  
Typical thickness and toughness of heavy plate steel for several industries<sup>27)</sup>

TMCP技術は様々な用途の鋼材(図3)に適用されている。例えば、 $-40^{\circ}\text{C}$ 以下の極寒冷地においても優れた溶接性を有する海洋構造物用鋼材<sup>33)</sup>、X80クラス以上の高強度においても高い変形能を有するラインパイプ用鋼材<sup>34)</sup>などが開発されている。前記着床式基礎に加え、浮体式基礎としてはセミサブ、スパーをはじめ多くの型式が提案されているが、これらは海洋構造物、船舶、建築構造物などで培った技術を応用したものである。そこで使用される鋼材も、同様に各分野に対して発展した技術が応用展開できると考えられる。

### 3.2 高能率溶接技術の適用

洋上風力発電の主電源化における大きな課題がコストであり、タワーおよび基礎構造の大量生産技術の確立と運転保守コストの低減が必要とされる。また、洋上風力発電設備は大型であり、使用される鋼材は厚いため、溶接部、溶接熱影響部(HAZ)の靱性および耐疲労特性の確保が極めて重要である。日本製鉄はこれらのニーズに対応した高品質な鋼材と高能率溶接技術、および疲労ソリューション(4.1節)の開発を進めてきた。

福島沖浮体式風力発電実証プロジェクト<sup>24)</sup>では、セミサブ型浮体を想定して鋼材と溶接技術の実証研究<sup>26,35)</sup>を実施

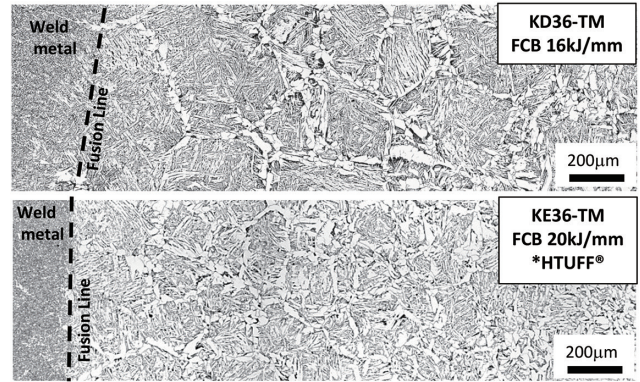


図4 溶接接手溶接線近傍のマイクロ組織<sup>35)</sup>  
Microstructures of welded joints<sup>35)</sup>

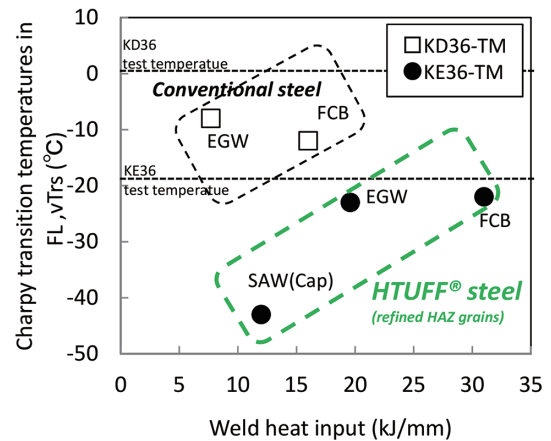


図5 溶接線の延性脆性遷移温度(vTrs)と溶接入熱との関係<sup>35)</sup>  
Relationship between Charpy (vTrs) in fusion line (root) and weld heat input<sup>35)</sup>

した。鋼材はNK船級船体用高張力TMCP鋼のKD36-TM(板厚25mm)、KE36-TM(同40mm, 50mm)を用い、特にKE36-TMには、HAZ高靱化技術(HTUFF®)<sup>36)</sup>を適用し、KD36-TMと比べてHAZの金属組織を微細化することで靱性の改善を図った(図4)。図5に接手靱性と溶接入熱の関係を示す。HAZ組織が微細であるKE36-TMでは、高能率な大入熱溶接(最大溶接入熱31kJ/mm)を適用した場合においても、延性脆性遷移温度(vTrs)は $-20^{\circ}\text{C}$ 以下となり、優れた靱性を確保することができた。

図6に、X開先(板厚60mm)のサブマージーク溶接(SAW)を想定し、欧州で用いられる海洋構造物用鋼材および溶接技術に倣った小入熱溶接(同3kJ/mm)を用いた場合を基準に、大入熱化した場合のアークタイムの変化を示す。入熱を10kJ/mmまで高めることで、アークタイムは66%削減可能となり、更に20kJ/mmまで高めると86%も削減できる。従って、HAZ高靱化技術を適用した大入熱溶接用TMCP鋼を用い、大入熱溶接を採用することで、溶接施工全体を大幅に効率化することが可能と言える。

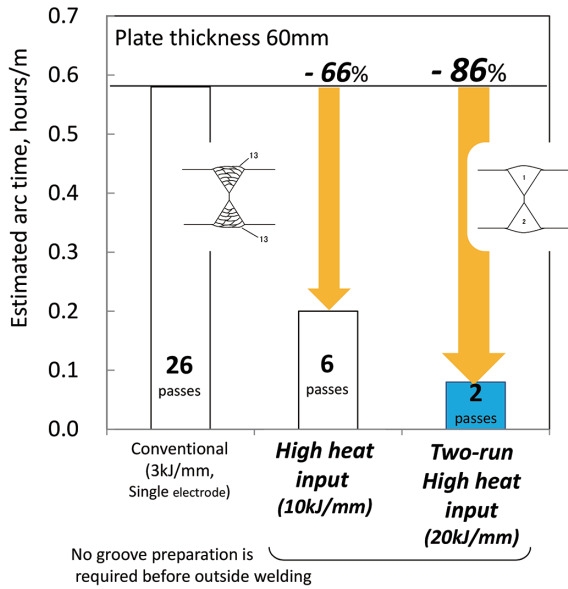


図6 大入熱溶接法によるアークタイム削減効果<sup>35)</sup>  
Advantages of high heat input SAW in arc time<sup>35)</sup>

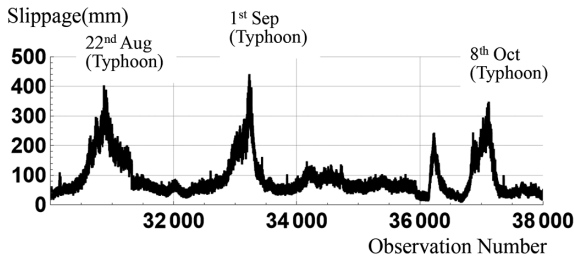


図7 チェーンリンクのすべり量の算定結果<sup>38)</sup>  
Calculated sliding behavior of mooring chain link<sup>38)</sup>

### 3.3 係留システムおよび洋上風力発電部品用鋼(棒鋼・線材)

浮体式洋上ウインドファームでは、浮体構造そのものとともに、多数の浮体の位置をいかに保持するかが重要な技術課題である。そこでは、構造や海象・海底環境に加え、運用性(点検、保守)や船舶衝突などの予期せぬ事態に対する冗長性なども考慮する必要があり、材料、設計、施工、維持管理に関する事項を総合的な視点から捉えた、経済合理性を具備する係留システムが求められる。福島沖浮体式風力発電実証プロジェクト<sup>24)</sup>においてはチェーンによる多点係留方式が採用され、日本製鉄および日鉄エンジニアリング(株)は係留チェーンの耐久性について研究を行った<sup>37)</sup>。まず、人工海水中摩耗試験によるチェーンリンクの摩耗量推定手法を確立し、その結果と浮体式風車の動揺観測データを用いて算定したチェーンリンク接触部に生じるすべり量(図7)から係留チェーンにおける摩耗状況(図8)、そして疲労損傷度を見積もることができた(図9)。これら知見を基に更に検討を加え、供用期間中の動揺観測によりチェーンリンクの摩耗、疲労損傷度の累積、健全度を把握してリスクを予見することが、設計・点検・保守を一体としたリスク管理手法となることを、世界に先駆けて実証的

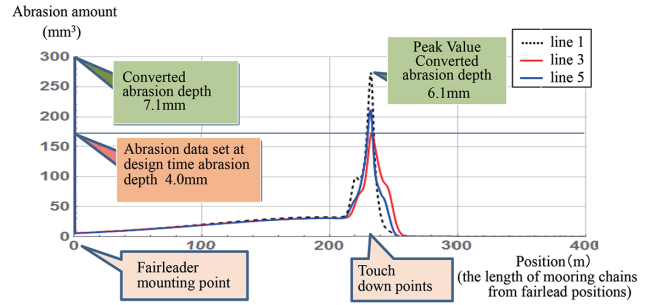


図8 摩耗量の係留ライン長手方向での分布<sup>38)</sup>  
Longitudinal distribution of wear on mooring chain<sup>38)</sup>

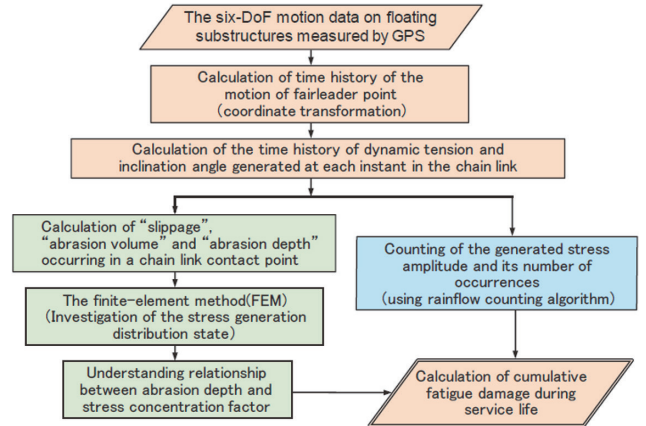


図9 浮体係留チェーンの疲労損傷度算定手法の全体構成<sup>38)</sup>  
Overall algorithm for fatigue damage evaluation of mooring chain<sup>38)</sup>

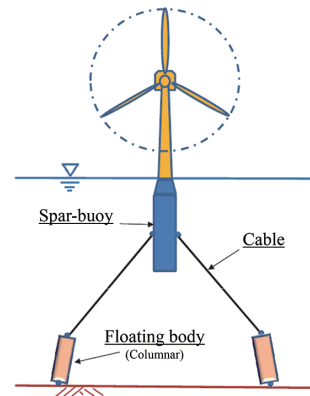


図10 高張力ケーブルを用いた係留システム<sup>39)</sup>  
Mooring system concept with high tensile parallel wire strand cable for floating offshore wind turbine<sup>39)</sup>

に提言した<sup>38)</sup>。

また、係留方法を選定するには浮体構造や設置環境などの条件に応じた検討が必要であり、チェーンによる係留システムが適正でない場合もある。例えば、日鉄エンジニアリングでは、鋼製の高張力ケーブルを用いた係留システム(図10 模式図)を提案している<sup>39)</sup>。このシステムはカタナリー式とトート式<sup>40)</sup>を組み合わせた係留方式であり、チェーン重量(カタナリー式)や係留索の伸び(トート式)ではなく、円柱部材の浮力を利用し、伸びにくいケーブルであっても柔らかい係留力特性を発揮するものである。この形式では

円筒部分の浮力を調整することで自在に係留特性を設定でき、200m以浅の比較的浅い海域や、利用を制限される海域においても、占有面積の小さい係留が実現可能となる。また、軽量で高耐久性の海洋向け高張力ケーブルを利用することで、チェーンに比べ、設置、点検、補修、撤去の各局面における作業効率を大幅に改善することができる。

洋上風力発電において、棒鋼・線材の用途はチェーンやケーブルによる係留に留まるものではない。例えば、発電機内部のベアリング、シャフト、歯車類には鋼材が用いられ、基礎構造には多数のボルト類を含み、いずれも高い耐久性が求められる。更に、チェーンと繊維索とを組み合わせた係留システム<sup>41)</sup>や、コンクリート製基礎構造を補強する鋼線<sup>8,42)</sup>など、他素材と共存する技術も棒鋼・線材には求められる。日本製鉄は、高品質棒鋼・線材商品の安定供給と、材料の理解と加工利用技術力とに基づいた“鋼材×工法”組合せによる価値創造<sup>43)</sup>を通じ、洋上風力発電市場に寄与していきたい。

## 4. LCC改善技術

### 4.1 疲労ソリューション

洋上風力発電の構造物には、波浪による外力に加えて、風やローターの振動などの変動外力が重畳して作用するため、溶接接合部などの応力集中部に対して疲労耐久性が求められる。そのため、発電設備の大型化を進めるには、溶接部の疲労強度を向上させるソリューション技術が必要となる。特に、大型化に際して高強度鋼を使用する場合、溶接部の疲労強度は鋼材強度のように上昇しないため、同

技術は重要となる。

溶接部の疲労特性を向上させるソリューションとして、超音波衝撃処理 (Ultrasonic Impact Treatment: UIT) がある。UITは、溶接止端部の形状改善に加えて圧縮残留応力も導入でき、溶接継手試験片や船舶、橋梁などの溶接構造物において疲労特性が飛躍的に向上することが確認されている<sup>44-51)</sup>。また、UITで導入される圧縮残留応力は高強度鋼ほど増大するため、高強度鋼とUITを併用することでさらなる高疲労強度化も期待される<sup>52)</sup>。

これまでに、福島沖での浮体式発電実証プロジェクト<sup>24)</sup>において、浮体構造体に対するUIT適用性として、構造モデル試験体を用い、その疲労特性向上効果を確認している<sup>53)</sup>。本実証試験では、要求疲労特性の最も厳しい部位の一つである浮体とタワー基部の接合部に設けるブラケット端角回し溶接部を模擬した構造モデル試験体 (図11) を製作し、UITを施工した後、疲労試験に供した。UITにはApplied Ultrasonics社製ESONIX<sup>®</sup>27UISを用いた。疲労試験結果を図12に示す。UIT後の試験体は、溶接ままの試験体よりも高い疲労強度を有しており、 $2 \times 10^6$ 回時間強度で比較するとUIT後の疲労強度は溶接ままの2倍以上となった。このようにUITにより、従来の船舶、橋梁の構造に加えて、浮体構造においても疲労強度の著しい向上が期待できる。

### 4.2 耐食鋼

海洋鋼構造物は、厳しい腐食環境に晒されることから、海中部分は電気防食、干満部、飛沫部、大気部は、防食塗装

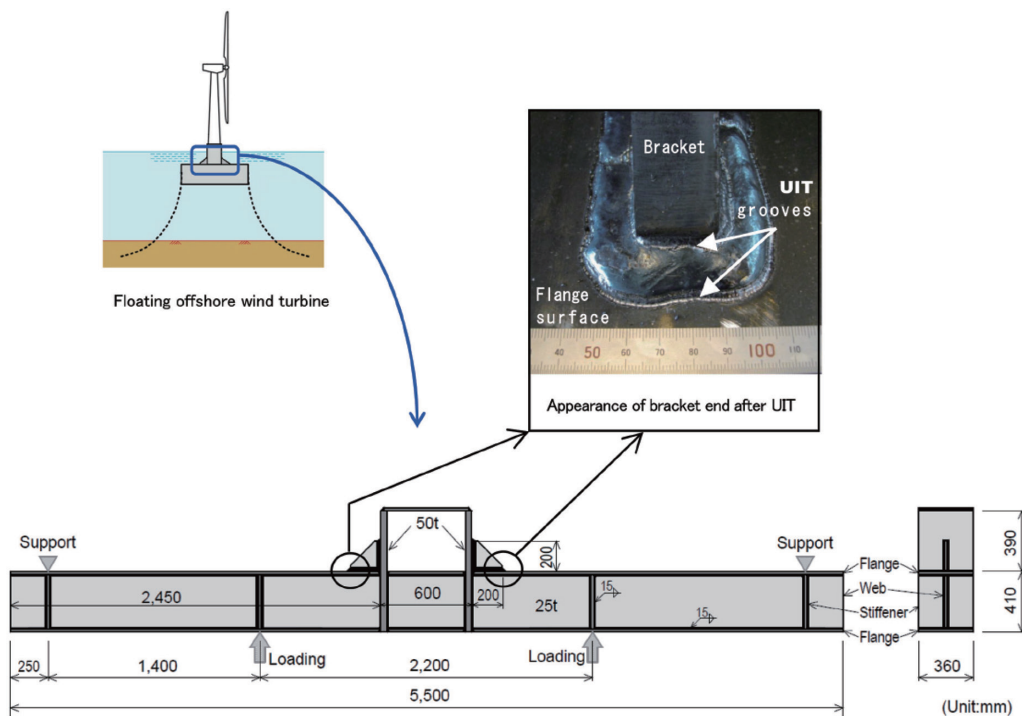


図11 大型構造モデル疲労試験体<sup>53)</sup>  
Large-scale structural fatigue specimen<sup>53)</sup>



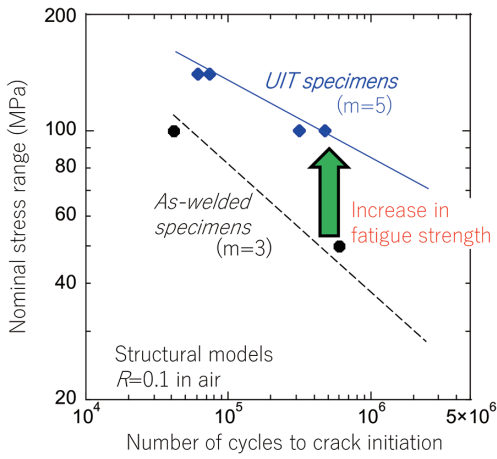


図 12 大型構造モデル疲労試験体の疲労特性<sup>53)</sup>  
Fatigue properties of large-scale structural specimens<sup>53)</sup>

されるのが一般的である。特に、洋上浮力発電は、腐食環境が厳しいことに加えて、陸上と比較してアクセスが難しいため、鋼構造物の防食の維持管理は大きなコストとなる。

日本製鉄は、酸性領域から中性領域、酸露点腐食、大気腐食、海水腐食などの腐食環境に応じた様々な低合金耐食鋼を開発・実用化している<sup>54)</sup>。低合金耐食鋼は、腐食環境に応じて、Cr、Cu、Ni、Sn等の耐食元素を少量かつ最適量添加することで経済合理性と耐食性を両立した鋼材であり、溶接性、加工性、機械的性質等は普通鋼に近く、普通鋼と同じように取り扱える特長を有する。低合金耐食鋼は、長寿命であり、メンテナンス負荷を低減することからライフサイクルコスト(LCC)の低減に寄与し、貴重な金属資源の消費を抑え、かつ、リサイクル性にも優れた低環境負荷の鋼材と言える。

また、洋上風力発電では、基地港および送電を受け取る海岸近くにも各種の設備が建設されるが、海岸近くは腐食環境としては厳しく、内陸と比較して防食塗装の劣化が早い。日本製鉄では、海岸近くで使用できる低合金耐食鋼として、CORSPACE®(塗装周期延長鋼)を開発・実用化している(図13)<sup>55,56)</sup>。CORSPACE®は、橋梁分野での使用を想定して開発した低合金耐食鋼であり、Snの少量添加を特徴とする。図14にCORSPACE®の暴露試験結果(沖縄県海岸地域:ISO12944-2の腐食カテゴリーC5~CXに相当)を示すが、大気、軒下とも、普通鋼と比較して腐食深さが半減していることが分かる。図15は、促進腐食試験法(SAE J2334)を用い、塗装普通鋼に対してCORSPACE®の塗替え時期(塗膜の剥離面積が15%となる期間)を算出したものであり、CORSPACE®は普通鋼に対して塗替えまでの期間が倍となることが分かる。

### 4.3 高耐食性材料

海洋構造物における腐食速度は環境や部位によって大きく異なる。最も厳しい腐食部位であり、かつ電気防食が作

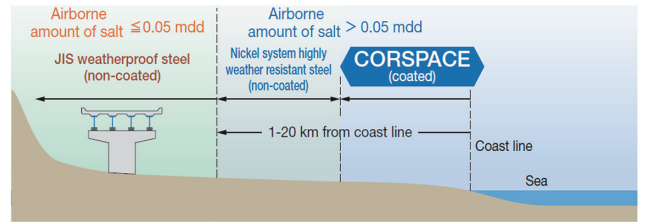


図 13 CORSPACE®の橋梁への適用イメージ<sup>55)</sup>  
Image of applying CORSPACE™ to a bridge<sup>55)</sup>

Corrosion depth in scratched area [5 years of exposure]

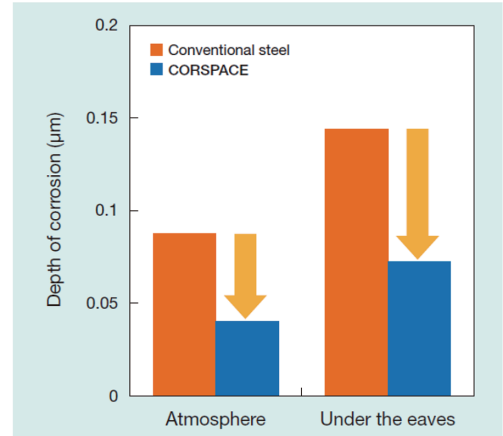


図 14 沖縄の海岸地域での曝露試験結果<sup>55)</sup>  
Evaluation after outdoor exposure test (Okinawa)<sup>55)</sup>

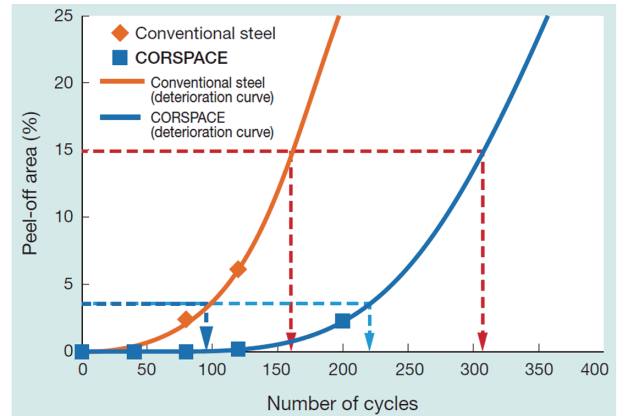


図 15 促進腐食試験(SAE J2334)を用いた普通鋼に対するCORSPACE®の塗替え時期の延長効果<sup>55)</sup>  
Coating film peel-off area of CORSPACE™ and conventional steel<sup>55)</sup>

用しない飛沫帯において、耐食鋼や塗装による防食では不十分な場合、スーパーステンレスやチタンといった高耐食性材料を用いて、鋼構造物表面を被覆する防食方法が用いられる場合がある。例えば、2010年に運用開始された東京国際空港D滑走路(図16)のジャケット構造(日鉄エンジニアリング)は、ジャケットレグに耐海水性ステンレス鋼被覆(被覆材:スーパーステンレス鋼SUS312L)を施し<sup>57)</sup>、更に、チタン薄板と塗装鋼板の間に不燃ウレタン芯材を挟んだパネル状の“チタンカバープレート”を滑走路栈橋部の下面、側面に設置してジャケット上部の鋼桁部を覆って

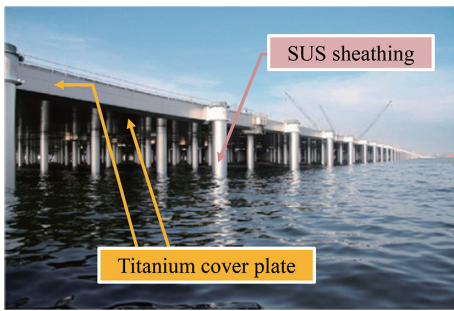


図 16 東京国際空港 D 滑走路棧橋部<sup>57)</sup>  
Offshore steel structure of Runway D of Haneda, Tokyo International Airport<sup>57)</sup>

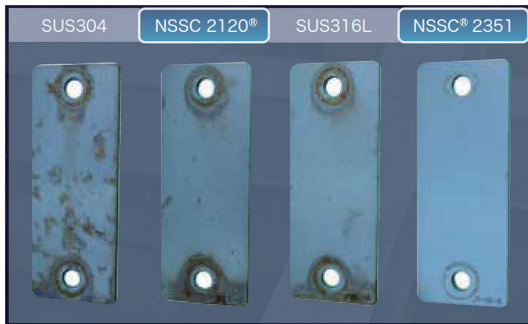


図 17 二相ステンレス鋼 NSSC2120®, NSSC®2351 の暴露試験結果 (東南アジア海上, 1 年間)<sup>62)</sup>  
Exposure test results of duplex stainless steels for 1 year in Southeast Asia ocean<sup>62)</sup>

いる<sup>58)</sup>。これらは、設計耐用年数である 100 年の間に大規模な補修工事が必要となる可能性を十分に下げ、LCC を最小化するために採用されている<sup>59)</sup>。

また、耐食性が求められる箇所へのステンレス鋼そのものの適用も考えられる。例えば、省合金二相ステンレス鋼 (NSSC2120®, NSSC®2351, 日鉄ステンレス(株))<sup>60), 61)</sup> は、海上大気部で使用可能な耐食性を維持しつつ、高価な Ni および Mo の一部を Cr, Mn, N に置き換えた省資源型の成分設計であり、かつ、高強度と優れた溶接性をも確保した材料である。図 17 に示す暴露試験結果<sup>62)</sup> では、NSSC2120®, NSSC®2351 の母材耐食性は代表的な耐食性材料である SUS316L と同等レベルまたは同等以上であり、溶接部においても遜色無い耐食性を示す。

環境、部位、腐食進行時のリスク、そして施工コスト、LCC を総合的に考慮し、これらの高耐食性材料や先述の耐食鋼や塗装等も加えた複数の手段と対比させることで、個々の事情に即した洋上風力向け耐食ソリューションの提案に繋げることができる。

## 5. 周辺領域、環境影響

### 5.1 送電網、港湾基地整備

洋上風力発電の主電源化には、発電設備そのものの整備に加え、施工能力および稼働後の運用体制を整備する必要がある。洋上風力発電の基地港には、大規模な部材を扱え

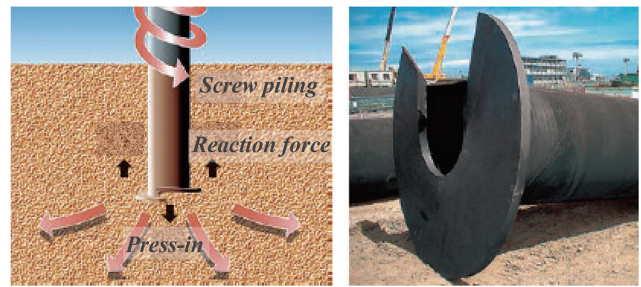


図 18 NS エコパイル® の概念図および外観<sup>63), 66)</sup>  
Conceptual illustration and photograph of NS ECO-PILE™<sup>63), 66)</sup>

る地耐力と広さを備えた埠頭、ならびに大型船が接岸できる岸壁が求められ、その整備には鋼管矢板や鋼管杭が不可欠である<sup>63)</sup>。

更に、日本製鉄は鋼材や建材に関する個々の商品・技術の提供に留まらず、土木建築分野での“鋼材×利用技術”による建設ソリューション“ProStruct®”<sup>64)</sup>により、課題解決に広く貢献することができる。例えば、洋上風力発電の適地は北海道、東北、九州に多く、大消費地である首都圏、関西圏への送電容量の増強が課題となる<sup>65)</sup>。送電に欠かせない鉄塔の基礎には一般的にコンクリート杭が広く用いられるが、その設置には多数の資機材の搬入や残土の搬出のため、山間部等では施工負荷が大きい。そこで、ProStruct® では山岳地での狭小地施工や隘路搬入が可能で、無排土・低振動・低騒音施工などの環境負荷低減に優れた回転鋼管杭工法“NS エコパイル®” (図 18)<sup>63), 66)</sup> を提供している。更に、この工法を適用した基礎杭は、貫入時に羽根部に推進力として作用した受動抵抗力がそのまま引抜き抵抗力として作用し、大きな引抜き支持力が得られる。

### 5.2 環境影響

発電設備を中心に、洋上風力発電には多量の鋼材が用いられる。鉄鋼材料は高いリサイクル性を有し、環境負荷の小さい材料である<sup>20)</sup>。また、鉄は地球上にありふれた元素であり、海洋中には鉄イオンが含まれ、人間をはじめとする動植物の体内では生命活動を維持するための必須元素として機能している<sup>67)</sup>。そのため、鉄元素の乏しい海域では生物の生育が抑制されると考えられ、例えば、国内沿岸部の“磯焼け”が起きる海域には海藻の生育に必要な窒素、リンといった栄養塩濃度だけでなく、鉄分の不足が指摘される例もある<sup>68)</sup>。

鉄鋼製品の副産物である鉄鋼スラグはセメント用材料、道路用路盤材、土木工専用資材として広く建設工事に利用されており、“カーボンフリーポート”の整備にも活用が想定されている<sup>69)</sup>。特に、鉄鋼スラグのうち、製鋼工程で得られる製鋼スラグには二価鉄に加え、藻類の必須栄養素であるケイ素、リンが多量に含まれ、海域の藻場造成を進めるための栄養供給源や基質材として活用することが可能で



ある(図19)<sup>70,71)</sup>。日本製鉄はこの製鋼スラグの“環境用資材”としての検討を進め、これまでに炭酸化処理を施した製鋼スラグに腐植物質を混合した藻場造成材(ビバリー®ユニット, ビバリー®バック, ビバリー®ボックス), 浚渫土砂の改質材として製鋼スラグを利用するカルシア改質材, そして製鋼スラグを骨材に用いた人工石材(ビバリー®ロック, ビバリー®ブロック)を開発してきた。

日本製鉄は、海洋環境を模擬した実験設備において鉄鋼スラグの効果検証およびメカニズム解明を進めるとともに(図20)<sup>71-73)</sup>、様々な海域での実証研究に取り組み、これら資材の効果をj確認している。例えば、北海道増毛では2004年からビバリー®ユニット等を活用した海藻藻場造成プロジェクト“海の森づくり”に取り組み、2014年に着手した別荘海岸の海岸線約300mにわたる海域(図21)では2022

Steel slag utilization to marine environmental restoration

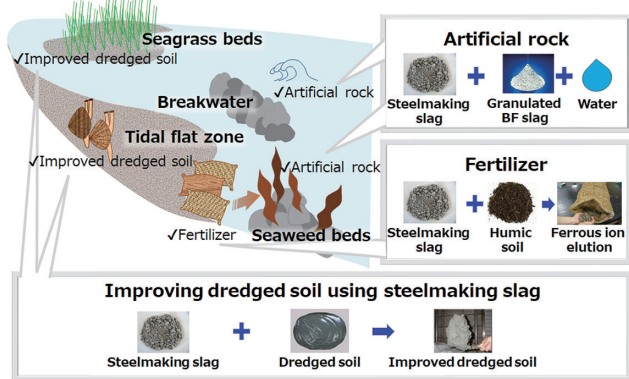


図19 鉄鋼スラグを活用した海域環境改善技術<sup>71)</sup>  
Slag utilization for marine environmental restoration<sup>71)</sup>

年には沖合80mまで広がる豊かな藻場を形成することができた<sup>73)</sup>。今後もスラグを活用した資材による藻場形成や環境負荷<sup>74)</sup>の検討を進めていき、港湾や沿岸部に限らず、ウインドファームの海洋構造物の活用等も考えたい。

6. まとめ

洋上風力発電の主電源化は、化石燃料への依存度を下げ、エネルギー自給率を高める上で必達である。洋上風力、特に浮体式における具体的な仕様、要求特性はこれから定まるものであり、それに沿って成立していく設備の製造工程や運用等の体制を合理的に進めていくことが求められる。日本製鉄グループは、材料のみならず工法・構造など複数の観点から、本稿で紹介した技術群を活かしつつ、それらに囚われない技術開発を進める“洋上風力ソリューション”によって国内外エネルギー産業に貢献していきたい。

参考文献

- 1) 例えば、十市, 小川, 佐川: エネルギーと国の役割. 日本エネルギー学会編, コロナ社, 2001, p.10-16
- 2) 資源エネルギー庁: エネルギー白書 2023. 2023, p.25-49
- 3) 経済産業省: 第6次エネルギー基本計画. 2021, p.34
- 4) 環境エネルギー政策研究所(ISEP): 2022年の自然エネルギー電力の割合(暦年・速報). 2023/08/26 参照  
<https://www.isep.or.jp/archives/library/14364>
- 5) Department for Business, Energy & Industrial Strategy (UK): Energy Trends: March 2020, p.59-66
- 6) Nalley, S. et al.: Annual Energy Outlook 2022 (AEO2022), U.S.

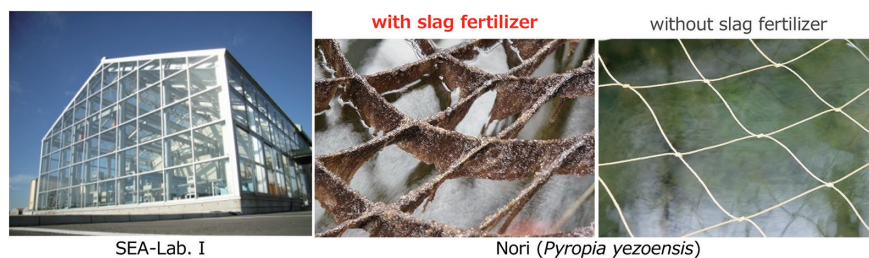


図20 大型水槽設備“シーラボI”での海藻栽培実験結果<sup>72)</sup>  
Seaweeds grown in the experimental seawater tanks in SEA-Lab.I with/without slag fertilizer<sup>72)</sup>

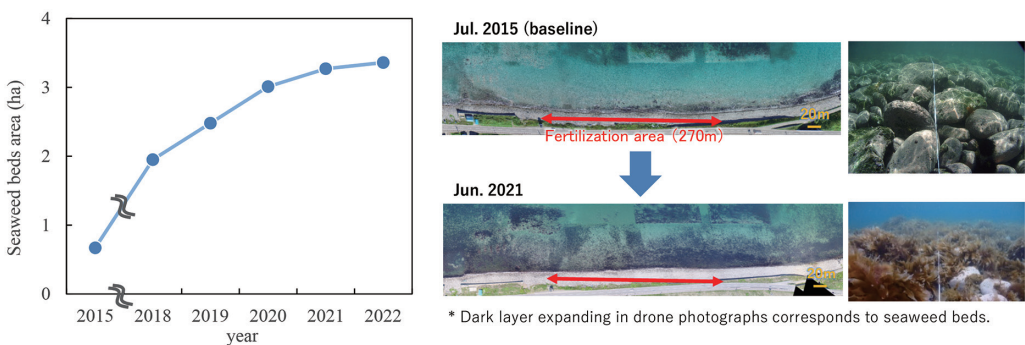


図21 北海道増毛の藻場面積の推移<sup>73)</sup>  
Expansion of marine forest in the experimental field (Mashike town, Hokkaido) from 2015 to 2022<sup>73)</sup>

- Energy Information Administration, 2022
- 7) 経済産業省：「秋田県能代市，三種町及び男鹿市沖」，「秋田県由利本荘市沖」，「千葉県銚子市沖」における洋上風力発電事業者の選定について。2023/08/26 参照  
<https://www.meti.go.jp/press/2021/12/20211224006/20211224006.html>
- 8) 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（改定版）。2020
- 9) 国土交通省：浮体式洋上風力発電施設技術基準。2020
- 10) 国土交通省港湾局：第12回交通政策審議会港湾分科会環境部会洋上風力促進小委員会資料2。2022
- 11) 宇都宮智明 ほか：土木学会論文集 B3（海洋開発）。70（2），11-16（2014）
- 12) 特殊鋼倶楽部：特殊鋼。63（4），2-10（2014）
- 13) 大嶽敦郎 ほか：日本製鉄技報。422，94-105（2023）
- 14) 国土交通省港湾局：第22回交通政策審議会港湾分科会環境部会洋上風力促進小委員会資料1。2023
- 15) 松信隆 ほか：日本風力エネルギー学会誌。44（4），595-599（2020）
- 16) 日本埋立浚渫協会：第1回洋上風力の産業競争力強化に向けた官民協議会資料。2020
- 17) 日本製鉄（株）：季刊ニッポンスチール。11，32-33（2022）
- 18) 石田亮一：ふえらむ。27（4），184-187（2022）
- 19) 大川大一 ほか：沿岸技術研究センター論文集。（15），11-14（2015）
- 20) 磯原豊司雄：日本製鉄技報。（417），11-14（2021）
- 21) 上城親司 ほか：日本製鉄技報。（417），22-29（2021）
- 22) 日本製鉄（株）：Nippon Steel Monthly。126，1-8（2003）
- 23) 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）：風力等自然エネルギー技術研究開発平成23年度実施方針。2011
- 24) 福島洋上風力コンソーシアム：ホームページ。2023/08/26 参照  
<http://www.fukushima-forward.jp/index.html>
- 25) 犬飼壮典 ほか：新日鉄住金エンジニアリング技報。4，30-38（2013）
- 26) 石原孟 ほか：JSSC（日本鋼構造協会会誌）。36，17-18（2019）
- 27) 大久保寛 ほか：日鉄エンジニアリング技報。13，20-38（2022）
- 28) 洋上風力の産業競争力強化に向けた官民協議会：洋上風力産業ビジョン（第1次）。2020
- 29) 本間竜一：JSSC（日本鋼構造協会会誌）。50，9-11（2022）
- 30) JIS G 3106：2020，溶接構造用圧延鋼材
- 31) 野見山裕治 ほか：新日鉄住金技報。（400），8-17（2014）
- 32) 日本製鉄（株）：Nippon Steel Monthly。169，10（2008）
- 33) Yoshida, Y. et al.: Proceedings of the 12th Int. Conf. OMAE, Glasgow, ASME, 1993
- 34) Hara, T. et al.: Proceedings of the International Pipeline Conference, Calgary, ASME, 2008
- 35) 本間竜一 ほか：ふえらむ。27（4），188-192（2022）
- 36) 児島明彦 ほか：まてりあ。42（1），67-69（2003）
- 37) 資源エネルギー庁：福島沖での浮体式洋上風力発電システム実証研究事業 総括委員会最終報告書。2022。p.25-26
- 38) 大久保寛 ほか：日鉄エンジニアリング技報。13，20-38（2022）
- 39) 鳥井正志：日鉄エンジニアリング技報。6，18-27（2015）
- 40) 国土交通省：浮体式洋上風力発電施設技術基準 安全ガイドライン。2020。p.1-9
- 41) 宇都宮智明 ほか：日本船舶海洋工学会講演会論文集。21，265-266（2015）
- 42) 国土交通省：（別冊）コンクリート製浮体式洋上風力発電施設の設計施工ガイドライン。2023
- 43) 日本製鉄（株）：SteelLinC® カタログ
- 44) Statnikov, E.S.: IIW Doc. XII-1668-97, 1997
- 45) Haagensen, P.J. et al.: IIW Doc. XIII-1748-98, 1998
- 46) 島貫広志 ほか：溶接学会全国大会講演概要。81，342（2007）
- 47) 野瀬哲郎 ほか：日本機械学会論文集 A 編。74（737），166-167（2008）
- 48) 島貫広志 ほか：溶接構造シンポジウム2009 講演論文集。479-482（2009）
- 49) Mori, T. et al.: Welding in the World. 56, 141-149（2012）
- 50) Okawa, T. et al.: Welding in the World. 57, 235-241（2013）
- 51) 島貫広志 ほか：新日鉄住金技報。（400），100-108（2014）
- 52) Yonezawa, T. et al.: Welding in the World. 64, 171-178（2020）
- 53) 本間竜一 ほか：新日鉄住金技報。（400），52-59（2014）
- 54) 児島明彦 ほか：新日鉄住金技報。（400），3-7（2014）
- 55) 日本製鉄（株）：CORSPACE® 塗装周期延長鋼カタログ
- 56) 菅江清信 ほか：新日鉄住金技報。（400），79-85（2014）
- 57) 松永修平 ほか：日本製鉄技報。（416），154-159（2020）
- 58) 時田昌久 ほか：新日鉄住金技報。（396），9-15（2013）
- 59) 佐藤弘隆：第64回白石記念講座。日本鉄鋼協会，2012
- 60) 及川雄介 ほか：まてりあ。55（2），70-72（2016）
- 61) 及川雄介 ほか：日本製鉄技報。（416），23-28（2020）
- 62) 日鉄ステンレス（株）：NSSC® Duplex series カタログ
- 63) 日本製鉄（株）：季刊ニッポンスチール。11，32-33（2022）
- 64) 平田尚 ほか：日本製鉄技報。（420），2-9（2023）
- 65) 電力広域的運用推進機関：広域系統長期方針。2023
- 66) 日本製鉄（株）：日本製鉄の鋼管杭・鋼管矢板工法カタログ
- 67) 日本製鉄（株）：カラー図解 鉄と鉄鋼がわかる本。日本実業出版社，2004
- 68) Matsunaga, K. et al.: J. Exp. Mar. Biol. Ecol. 241, 193（1999）
- 69) 日本港湾協会：第1回洋上風力の産業競争力強化に向けた官民協議会資料。2020
- 70) 加藤敏明 ほか：新日鉄住金技報。（399），79-84（2014）
- 71) 小杉知佳 ほか：日本製鉄技報。（417），52-61（2021）
- 72) 加藤敏明 ほか：新日鉄住金技報。（399），85-89（2014）
- 73) 日本製鉄（株）：季刊ニッポンスチール。15，8-11（2023）
- 74) 加藤敏明 ほか：日本製鉄技報。（417），92-97（2021）



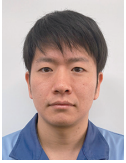
川田裕之 Hiroyuki KAWATA  
鉄鋼研究所 高靱性鋼材研究部  
高機能化研究室 上席主幹研究員 博士(工学)  
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



本間竜一 Ryuichi HOMMA  
東日本技術研究部 鋼材研究室  
厚板・形鋼・鋼管研究課長 博士(工学)



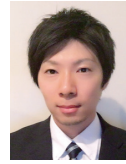
加茂孝浩 Takahiro KAMO  
鉄鋼研究所 接合研究部  
接合材質研究室長



米澤隆行 Takayuki YONEZAWA  
鉄鋼研究所 材料信頼性研究部  
応用力学研究室 主任研究員



金子道郎 Michio KANEKO  
鉄鋼研究所 材料信頼性研究部  
主席研究員 博士(工学)



久積和正 Kazumasa HISAZUMI  
鉄鋼研究所 鋼構造研究部  
鋼構造研究第一室 研究第一課長 博士(工学)



小杉知佳 Chika KOSUGI  
先端技術研究所 環境基盤研究部  
環境技術研究室 研究第一課長  
博士(水産科学)



奥島基裕 Motohiro OKUSHIMA  
厚板・建材事業部 厚板技術部  
厚板商品技術室 上席主幹



武川啓之 Hiroyuki TAKEKAWA  
プロジェクト開発部 プロジェクト開発室  
プロジェクト開発第一課長