

(技術資料)

洋上風力発電設備向け溶接施工法および溶接材料

山口幸祐*¹・加納 寛*¹

Welding Method and Welding Consumables for Offshore Wind Power Generation Facilities

Kosuke YAMAGUCHI・Satoru KANO

要旨

2050年のカーボンニュートラル実現に向けて、国内ではCO₂排出量の低い再生可能エネルギーを用いた発電方法への関心が高まっている。なかでも洋上風力発電は、昨今注目が高まっている発電方法の一つである。洋上風力発電設備では、風車を支える基礎部位としてモノパイルなどが用いられる。近年、風車が大型化され、基礎部位であるモノパイルも杭径や杭長が巨大化している。巨大モノパイルには、極厚板が採用されており、極厚板の溶接に好適な溶接施工法や溶接材料が求められ望まれている。当社では、これらの要望に応えるために、極厚板の溶接に好適な新エレクトロスラグ溶接施工法である「SESTM」と狭開先サブマージアーク溶接材料である「FAMILIARCTM US-29HK / TRUSTARCTM PF-H55LT-N」を開発した。

Abstract

Japan's domestic policy aimed to achieve carbon neutrality by 2050 has resulted in a growing interest in power generation methods that employ renewable energy sources with low CO₂ emissions. Among these methods, offshore wind power generation has garnered significant attention in recent years. Wind turbines in offshore facilities rely on foundations such as monopiles for support. With the increasing size of wind turbines, the monopiles have also grown gigantic in diameter and length, making it necessary to use extra-thick steel plates for their construction. Welding these plates requires an appropriate welding process and welding consumables. To meet these requirements, Kobe Steel has developed a new electroslag welding process for welding extra-thick plates, SESTM, and welding consumables for narrow-groove submerged-arc welding, FAMILIARCTM US-29HK and TRUSTARCTM PF-H55LT-N.

検索用キーワード

カーボンニュートラル, 再生可能エネルギー, 洋上風力, モノパイル, 極厚板, エレクトロスラグ溶接, SESTM, 狭開先サブマージアーク溶接

まえがき = 2011年3月11日に発生した東日本大震災以降、国内のエネルギー政策が見直され、新たなエネルギー源として再生可能エネルギーへの期待が高まっている。その中で、とくに注目されている再生可能エネルギーの一つが洋上風力発電であり、欧州各国でも直面するエネルギー危機を切り抜けるために、相次いで洋上風力発電の大規模な導入見通しを発表している。国内でも、洋上風力促進区域においてラウンド1の入札が完了し、今後、ラウンド2およびラウンド3の入札も見込まれている¹⁾。

洋上風力発電では、設置、係留、系統連系、運転、保守にかかるコストが大きく、採算性を確保するためには風車1基当たりの発電量を高めることも重要である。ロータ直径の大型化による定格出力増強の技術開発も活発に行われており、図1に示すように、風力発電における風車の定格出力は年々増加している。近年では、定格出力5~8 MWの風車が洋上風力発電に採用されている。今後は10 MW以上の定格出力を備える大型風車の採用も想定され、洋上風力発電設備の大型化が進むと判断される²⁾。

図2に示すように、洋上風力発電設備では風車を支

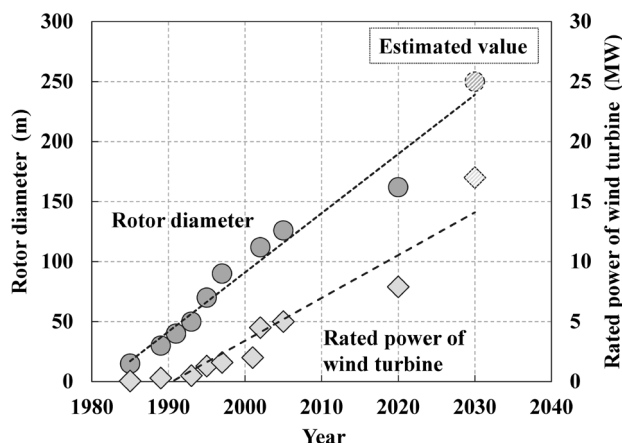


図1 ロータ直径と風力発電用風車の定格出力の推移^{3)~5)}
 Fig.1 Growth of rotor diameter of wind turbines and rated power for wind power generation^{3)~5)}

えるタワーや海面下のモノパイルなどが基礎部位に用いられる。これらは、板厚50 mm超の極厚板を用いた鋼製単管を溶接継ぎして製作される。単管製作や単管の溶接継ぎでは、縦方向や円周方向の溶接が不可欠であり、極厚板の高効率な溶接施工法が望まれている。

本稿では、極厚板における縦方向（縦シーム）の溶接

*¹ 溶接事業部門 技術センター 溶接開発部

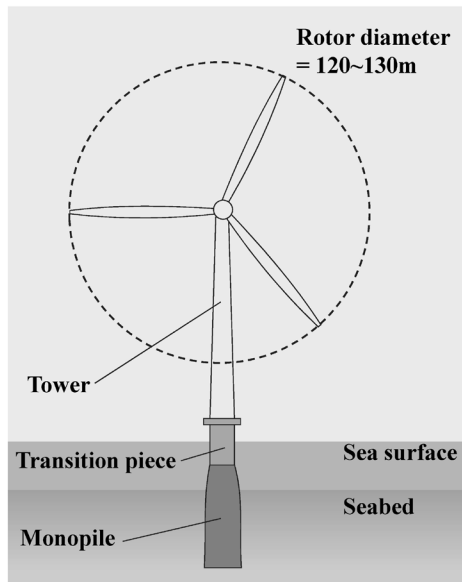


図2 5 MW級洋上風力発電設備の模式図

Fig.2 Schematic image of a 5 MW-class offshore wind power generation facility

に好適な新エレクトロスラグ溶接法と、円周方向の溶接に好適な狭開先サブマージアーク溶接材料について紹介する。

1. 新エレクトロスラグ溶接法 SESLA™

新エレクトロスラグ溶接法 SESLA™ (以下、SESLA™ という) は、エレクトロスラグ溶接 (以下、ESW という) の要素技術をもとに当社が開発した高能率立向自動溶接法である⁶⁾。アーク溶接と異なり、ESWはスラグ浴を形成し、その抵抗発熱によりワイヤを熔融し溶接が進行するため、スパッタやヒューム発生量が極めて少ないという特長がある。また、熔融池はスラグ浴に保護されるため、シールドガスを使用しなくても耐風性に優れた施工である。SESLA™の構成を図3に示す。施工は開先の表側に水冷摺動(しゅうどう)銅板、裏側に裏当て材としてFAMILIARC™ KL-4を使用する。従来ESWと同様に、溶接スタート時にはアークを発生させ、投入したフラックスを溶解してスラグ浴を形成し、熔融したスラグ浴の電気抵抗発熱が熱源となり、フラックス入りワイヤを熔融させる。この際、スラグ浴の対流作用によって溶込みが形成され、厚板の突合せ継手においても1パスで溶接が完了する。

1.1 SESLA™専用溶接材料

エレクトロガスアーク溶接 (以下、EGW という) は、ESWと同様に高能率立向自動溶接法として造船分野等で幅広く適用されている。EGWはアークを熱源とし、シールドガスを用いるため、シールド不良のリスクやヒューム発生も含めた溶接環境も考慮する必要がある。いっぽう、ESWはシールドガスを用いることなく溶接が可能であるものの、溶接装置の構造から溶接長が制約される側面がある。

SESLA™はESWの短所を克服すべく、新たに開発した専用溶接装置と、専用溶接材料であるフラックス入りワイヤFAMILIARC™ ES-X55Eおよび熔融型フラック

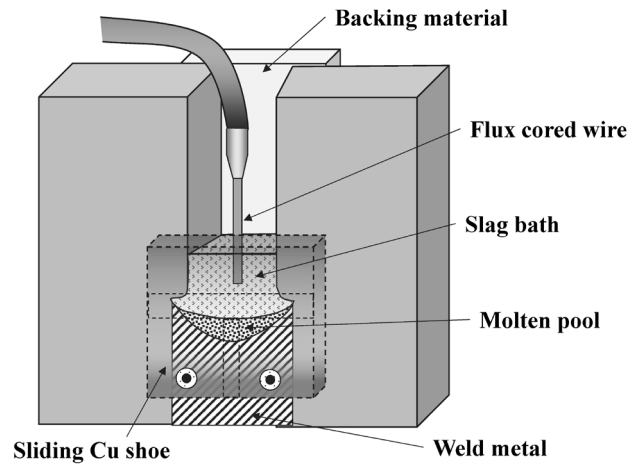


図3 SESLA™の構成

Fig.3 Configuration of SESLA™

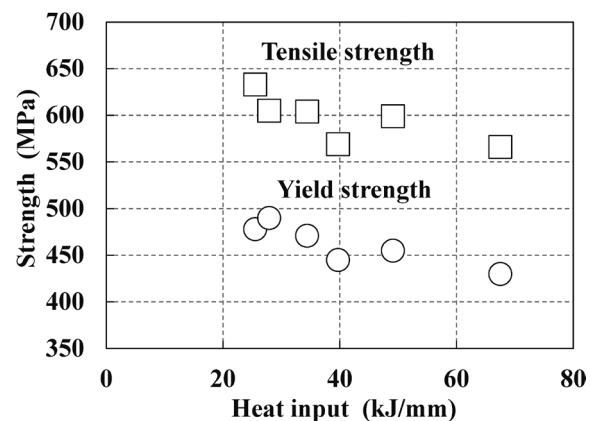


図4 SESLA™における入熱と耐力・引張強度の関係

Fig.4 Relationship between heat input and tensile strength of SESLA™

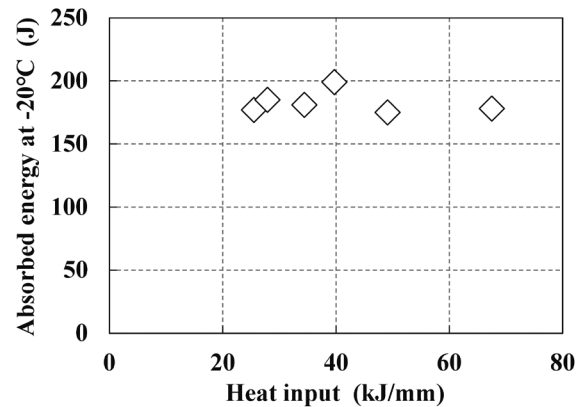


図5 SESLA™における入熱と-20°C吸収エネルギーの関係

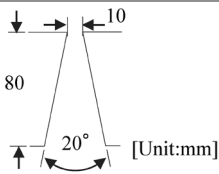
Fig.5 Relationship between heat input and -20°C absorbed energy in SESLA™

スFAMILIARC™ EF-4とを用いて行う溶接プロセスである。JIS G 3106 SM490A鋼板を用い、入熱がSESLA™溶接金属の機械的性質に及ぼす影響を調査した。入熱と耐力・引張強度の関係を図4、入熱と-20°C吸収エネルギーとの関係を図5に示す。SESLA™溶接金属の強度は入熱の増加とともに低下するが、優れたじん性を維持することができる。

1.2 極厚板への適用

SESLA™では、幅広い入熱範囲で良好な機械的性質が得られ、板厚80 mmまでは1パスで溶接可能であることが確認されている。板厚80 mmの極厚板溶接の試験および溶接条件を表1に示す。母材にはJIS G 3106

表1 試験および溶接条件
Table 1 Test condition of butt joint welding

Wire-flux combination	FAMILIARC™ ES-X55E/FAMILIARC™ EF-4
Base metal	JIS G 3106 SM490A, 80 mm×(150+150) mm×600 mm ¹
Groove configuration	
Welding parameter	DCEP, 420 A-47 V-17 mm/min
Heat input	69.7 kJ/mm
Preheat	Room temp.
PWHT condition	As-welded

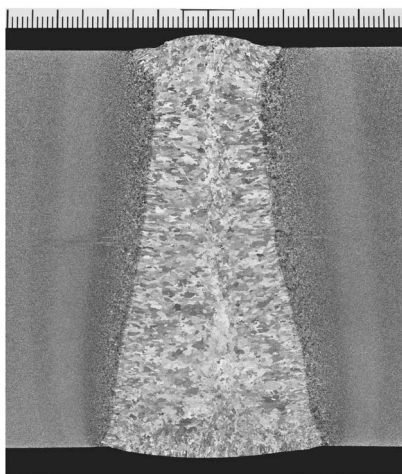


図6 溶接継手の断面マクロ
Fig.6 Cross-sectional macrograph of weld joint

表2 溶着金属の化学成分(mass%)*1
Table 2 Chemical composition of weld metal (mass%)*1

C	Si	Mn	P	S
0.06	0.20	1.22	0.010	0.004

*1 Location: Center of weld metal

表3 溶着金属の機械的性質
Table 3 Mechanical properties of weld metal

Location	Tensile properties*1			Notch toughness*1			
	0.2%PS (MPa)	TS (MPa)	El. (%)	Absorbed energy (J)			Avg.
				[-40°C]		[-20°C]	
7 mm beneath the face side	435	561	24	168	Avg. 163	186	Avg. 199
				169		196	
				153		214	
40 mm beneath the face side	438	568	25	191	Avg. 174	202	Avg. 200
				176		207	
				155		200	
73 mm beneath the face side	446	577	23	162	Avg. 161	184	Avg. 173
				159		200	
				163		136	

*1 Tensile test specimen: round tensile specimen, Dia.=6.0 mm, G.L.=24 mm
Impact test specimen: 10×10 mm square shape, 2 mm V notch based on AWS B4.0

SM490Aを使用した。溶接継手の断面マクロ組織を図6、溶着金属の化学成分を表2、その機械的性質を表3に示す。板厚80 mmにおける溶込みは良好であった。入熱は69.7 kJ/mmまで増加したが、溶着金属は十分な強度および-40°Cでの良好なじん性を確保できている。

2. 狭開先サブマージアーク溶接材料

極厚板の溶接には、高溶着な施工法であるサブマージアーク溶接（以下、SAWという）も用いられる。その高能率化には、開先の狭開先化が有効な手段の一つである。狭開先対応のSAW材料として、FAMILIARC™ US-29HK/TRUSTARC™ PF-H55LT-Nを新たに開発した。その詳細を以下に紹介する。

FAMILIARC™ US-29HKは炭素鋼用ソリッドワイヤ、TRUSTARC™ PF-H55LT-Nはふっ化物-塩基性酸化物系のボンドフラックスであり、塩基度を高めたフラックス設計を採用している。その特長は、フラックス設計の最適化により良好なじん性と狭開先における良好なスラグ剥離性を確保し、直流(DCEP)および交流(AC)で使用できる点にある。

2.1 溶着金属の諸性能

FAMILIARC™ US-29HK/TRUSTARC™ PF-H55LT-Nの溶着金属の諸性能を調査した。直流(DCEP)および交流(AC)における溶着金属の化学成分を表4、溶接のままの機械的性質を表5および図7に示す。高強度(550 MPa超)で、-60°Cまでの吸収エネルギーが良好な溶着金属が得られることが確認されている。

FAMILIARC™ US-29HK/TRUSTARC™ PF-H55LT-Nの組合せで、直流(DCEP)で溶接した場合の拡散性水素量を表6に示す。フラックス設計の最適化により、拡散性水素量は約3 mL/100gと低い値を示している。

2.2 溶接継手の諸性能

FAMILIARC™ US-29HK/TRUSTARC™ PF-H55LT-Nの組合せで狭開先SAW溶接試験を行い、溶接

表4 溶着金属の化学成分(mass%)*1,2
Table 4 Chemical composition of deposited metal (mass%)*1,2

	Polarity	C	Si	Mn	P	S
[F]US-29HK,	DCEP	0.07	0.29	1.85	0.013	0.002
[T]PF-H55LT-N*3	AC	0.08	0.27	1.73	0.013	0.002

*1 Location: Center of the deposited metal

*2 Welding condition: 550 A-30 V-420 mm/min; Ext.=30 mm; 4.0 mm wire dia.

*3 [F]: FAMILIARC™ welding consumables,
[T]: TRUSTARC™ welding consumables

表5 溶着金属の機械的性質*1,2
Table 5 Mechanical properties of deposited metal*1,2

	PWHT condition	Polarity	0.2%PS (MPa)	TS (MPa)	El. (%)
[F]US-29HK, [T]PF-H55LT-N*3	As-welded	DCEP	514	603	28
		AC	534	618	29

*1 Size of impact test specimen is based on AWS B4.0

Tensile test specimen: round tensile specimen, Dia.=12.5 mm, G.L.=50 mm

Location: the same as analysis location for chemical composition

*2 Welding condition: 550 A-30 V-420 mm/min; Ext.=30 mm; 4.0 mm wire dia.

*3 [F]: FAMILIARC™ welding consumables,
[T]: TRUSTARC™ welding consumables

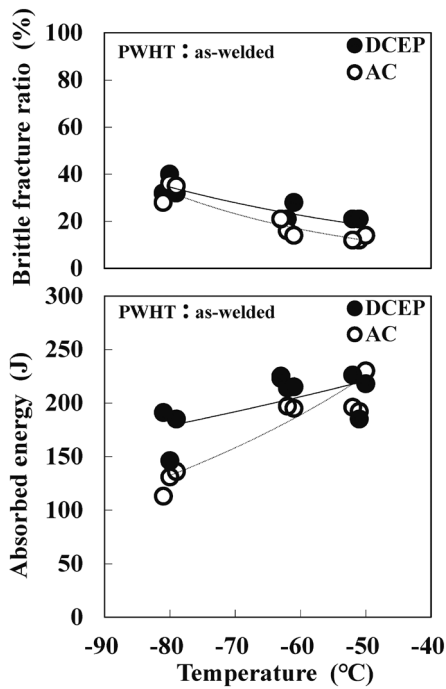


図7 溶接継手のじん性遷移曲線^{*1,2}

Fig.7 Transition curves of notch toughness of deposited metal in as-welded condition^{*1,2}

- *1 Size of impact test specimen is based on AWS B4.0
Impact test specimen: 10 × 10 mm square shape, 2 mm V notch
Location: the same as analysis location for chemical composition
- *2 Welding condition: 550 A-30 V-420 mm/min; Ext.=30 mm; 4.0 mm wire dia.

表6 拡散性水素試験結果^{*1}

Table 6 Diffusible hydrogen test results^{*1}

	Polarity	Diffusible hydrogen content (mL/100g)			
		N=1	N=2	N=3	Avg.
[F]US-29HK, [T]PF-H55LT-N	DCEP ^{*2}	3.2	3.3	3.3	3.3

- *1 Test method: JIS Z3118, gas chromatography method
- *2 Welding condition: 550 A-30 V-400 mm/min; Ext.=30 mm; 4.0 mm wire dia.
Redrying condition: 350°C × 1 h, Welding atmosphere: 11°C × 79 %RH

表7 試験条件

Table 7 Test condition of both side butt joint welding

Electrode	FAMILIARC TM US-29HK, Leading electrode(L):4.0 mm dia. Trailing electrode(T):2.4 mm dia. × 2 wires
Flux	TRUSTARC TM PF-H55LT-N
Base metal	JIS G 3106 SM490A, 80 mm ^L × (150+150) mm ^W × 800 mm ^L

表8 溶接条件

Table 8 Welding parameters for both side butt joint welding

	No. of passes	Welding parameter ^{*1}	Heat input (kJ/mm)
1st side	1	Single, DCEP, 600 A-30 V-600 mm/min	1.8
	2	Single, DCEP, 650 A-30 V-600 mm/min	2.0
	3-8	Tandem, L: DCEP, 650 A-30 V T: AC, 600 A-32 V-700 mm/min	3.3
2nd side	1	Single, DCEP, 600 A-30 V-600 mm/min	1.8
	2-21	Tandem, L: DCEP, 650 A-30 V T: AC, 600 A-32 V-700 mm/min	3.3

- *1 Preheat and inter pass temperature.:100~147°C

継手の諸性能を評価した。試験条件を表7, 溶接条件を表8, 開先形状と施工要領を図8に示す。高能率化を目的にタンデム溶接とし, 後行極には2.4 mmの双極を適用した。タンデム溶接の電極配置を図9に示す。溶接継手の断面マクロを図10, 溶接金属の化学成分を表9, その機械的性質を表10に示す。溶接継手においても, 強度を確保しつつ, -60°Cで良好な衝撃性能を確保でき

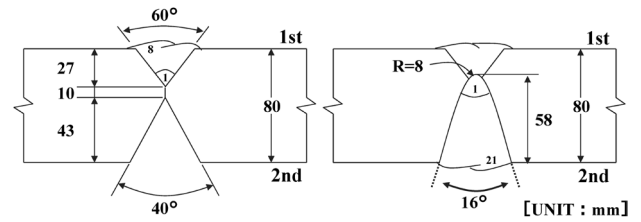


図8 開先形状と施工要領

Fig.8 Groove configuration and pass sequences

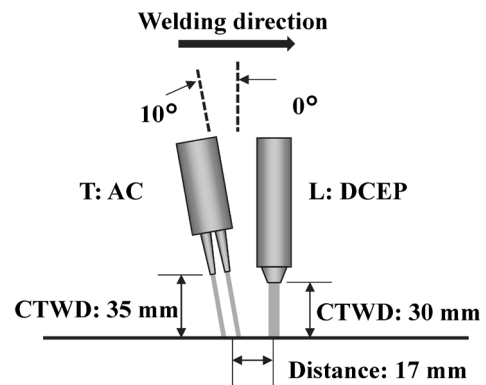


図9 タンデム溶接の電極配置

Fig.9 Electrode configuration of tandem welding

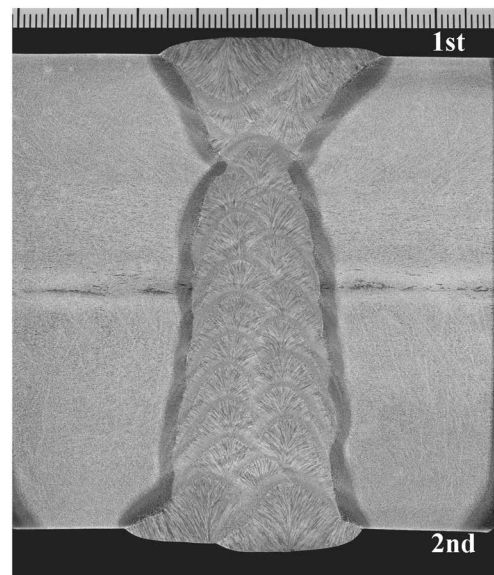


図10 溶接継手の断面マクロ

Fig.10 Cross-sectional macrograph of both side butt joint welding

表9 溶接金属の化学成分 (mass%)^{*1}

Table 9 Chemical composition of weld metal (mass%)^{*1}

C	Si	Mn	P	S
0.09	0.30	1.78	0.014	0.003

- *1 Location: Center of weld metal

表 10 溶接金属の機械的性質*1
Table 10 Mechanical properties of weld metal*1

Location	Tensile properties*2			Notch toughness*2			
	0.2 %PS (MPa)	TS (MPa)	El. (%)	Absorbed energy (J)			
				【-60°C】		【-40°C】	
7 mm beneath 2nd side	496	618	33	112 123 127	Avg. 121	161 156 147	Avg. 155
40 mm beneath 2nd side	580	634	28	162 181 152	Avg. 165	194 196 196	Avg. 195
73 mm beneath 2nd side	591	664	28	128 130 179	Avg. 146	184 185 183	Avg. 184

*1 PWHT condition: as-welded

*2 Tensile test specimen: round tensile specimen, Dia.=6.0 mm, G.L.=24 mm

Impact test specimen: 10×10 mm square shape, 2 mm V notch based on AWS B4.0

ている⁷⁾。

むすび=近年、再生可能エネルギーとして持続的に利用可能な風力発電への期待が高まっており、とくに洋上風力発電は、ヨーロッパから世界的に導入が拡大している。国内でも第6次エネルギー基本計画（2021年）において、再生可能エネルギー主力電源化の切り札として、洋上風力発電の大規模な導入が閣議決定されている⁸⁾。

本稿では、洋上風力発電設備の巨大モノパイルなどの製作に用いられる極厚板の溶接に好適な溶接施工法 SESLATMと狭開先SAW材料である「FAMILIARCTM US-29HK / TRUSTARCTM PF-H55LT-N」について紹介した。いずれも極厚板の高効率な溶接施工に寄与するとともに、洋上で用いられる鋼製大構造物に必要な強度と低温じん性を兼ね備えた良好な機械的性質を有する溶接金属を得ることができる。これにより、今後、溶接継手の健全性・信頼性のみならず、発電設備の大型化・量産化が求められる洋上風力分野での幅広い適用が期待される。

参 考 文 献

- 1) 自然エネルギー財団. 洋上風力発電の動向. 第3版, 2022, p.6-19.
- 2) 新エネルギー・産業技術総合開発機構. NEDO 再生可能エネルギー技術白書. 第2版. 第3章洋上風力. 森北出版, 2014, p.45-46.
- 3) 本庄暢之. 電気学会誌. 2009, Vol.129, No.5, p.284-287.
- 4) IRENA. Renewable Power Generation Costs in 2021. 2022, p.106.
- 5) IEA. World Energy Outlook 2019. 2019, p.619-620.
- 6) 柿崎智紀. ほうだより. 2020, Vol.507, p.2-6.
- 7) Kobelco Welding Today. 2021, Vol.24, p.3-7.
- 8) 経済産業省 資源エネルギー庁. 第6次エネルギー基本計画. 2021, p.34-60.