

特集：洋上風力発電

洋上風力発電構造物の適用鋼材
(風車、タワー、支持構造物)

日本製鉄株式会社
本 間 竜 一

1. はじめに

近年、洋上風車の大型化が進んでおり、今後主流になる発電容量 15MW 級の風車のローター直径は約 250m に達すると言われている。これは東京都庁第一本庁舎に匹敵する高さである。将来、このような巨大な風車が年間数 10 基建設される計画であり、タワーや支持構造物の製造には大量の鋼材が必要となる。一方、洋上風力発電構造物は、過酷な気象、海象条件の下で 20 年以上の長期間に渡り安定して稼働し、地震、台風、津波などの稀に発生する自然災害に対しても安全性が確保されることが求められており、それを実現可能な高性能鋼材が必要とされている。本報では、このような洋上風力発電構造物に適用される高性能鋼材およびその関連技術を紹介する。

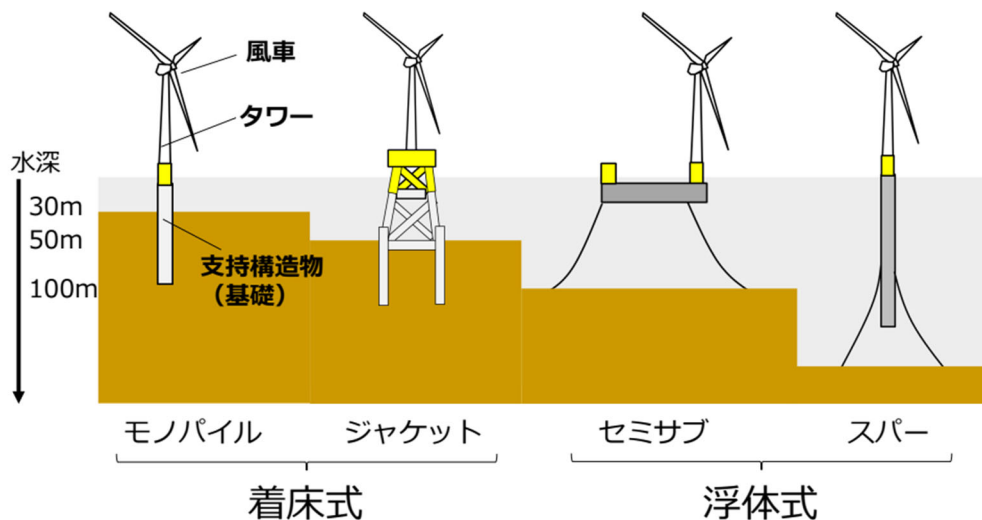


図 1 洋上風力発電の主な形式

2. 着床式洋上風力発電用の厚鋼板

図 1¹⁾ に示すように着床式洋上風車の支持構造物にはモノパイル形式とジャケッ形式の主に二つの構造形式があり、例えば上述の 15MW 級風車用のモノパイルは直径 10m 超、長さ 60m 超、総重量は 2000 トン/基を超える巨大な鋼構造物となることが想定される。このようなモノパイルには引張強度 50 キロ級で比較的厚手の鋼板が用いられる。図 2¹⁾ に様々な分野で用いられる厚鋼板の板厚と靱性保証温度の主要な範囲を示す。モノパイルに用いられる厚鋼板の板厚は船舶向けよりも厚く、海洋

構造物や高層建築向けと同等かそれ以上に厚手になることが特徴である。前述のように風車の大型化が進むと板厚 100mm 超の極厚鋼材の適用が検討される場合も考えられる。一般的に板厚が厚いほど、鋼材には高い清浄度や優れた内質の確保が求められる。このような鋼材を大量かつ安定して製造するためには厳格な品質管理と高い技術力が必要となる。

洋上風力発電が先行する欧州のモノパイルには EN 規格の溶接構造用鋼が主に用いられる。日本では経済産業省と国土交通省が策定した「洋上風力発電設備に関する技術基準の統一的解説」²⁾ に準拠して設計されており、タワーおよび着床式支持構造物に関しては建築基準法に準拠した JIS 規格材料あるいは 2014 年以前に国土交通大臣認定を受けた鋼材が用いられる。表 1、表 2 に洋上風力発電設備に適用可能な溶接構造用圧延鋼材の例として JIS 規格材料である SM490C、SM520C の化学成分と機械的特性³⁾ について示す。

SM490C と SM520C には炭素当量の制限はないが、熱加工制御により製造される場合は炭素当量の上限が規定される。SM490C と SM520C の引張強さは、それぞれ 490-610MPa、520-640MPa であり板厚による変化はないが、耐力は板厚が厚くなるほど低下し、例えば SM520C では板厚 75-100mm で 325MPa 以上となる。

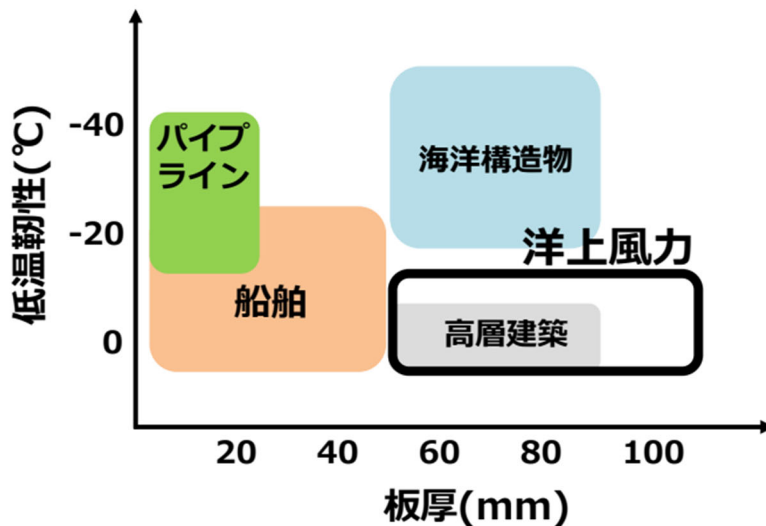


図 2 様々な分野で用いられる厚鋼板の板厚と靱性保証温度

表 1 溶接構造用圧延鋼材の化学成分の例（板厚 100mm 以下）

	化学成分 (mass%)						
	C	Si	Mn	P	S	その他	炭素当量
SM490C	≦ 0.18	≦ 0.55	≦ 1.65	≦0.035	≦0.035	必要に応じて この表以外の	規定無し ^{a)}
SM520C	≦ 0.20	≦ 0.55	≦ 1.65	≦0.035	≦0.035	成分を添加し てもよい	規定無し ^{b)}

$$C_{eq} = C + Mn/6 + Si/24 + Ni/40 + Cr/5 + Mo/4 + V/14, P_{cm} = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + 5B$$

a) 受渡当事者間の協定によって熱加工制御を行った板厚 50-100mm の鋼板の場合、 $C_{eq} \leq 0.40$ 、及び $P_{cm} \leq 0.26$

b) 受渡当事者間の協定によって熱加工制御を行った板厚 50-100mm の鋼板の場合、 $C_{eq} \leq 0.42$ 、及び $P_{cm} \leq 0.27$

表 2 溶接構造用圧延鋼材の機械的特性の例（板厚 100mm 以下）

	機械的特性			
	耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	シャルピー衝撃値(J) カッコ内は試験温度	伸び(%)
SM490C	≥295 ^{c)}	490-610	≥47 (0°C)	≥21 ^{d)}
SM520C	≥325 ^{c)}	520-640	≥47 (0°C)	≥21 ^{d)}

c) 板厚 75-100mm、d) 板厚 40mm を超えるもの

シャルピー試験片採取方向：圧延方向

3. 浮体式洋上風力発電用厚鋼板

日本では着床式に適した水深 30 m 以下の海域に限られており、2030 年頃から浮体式の商用設置が始まる予定である⁴⁾。浮体式の支持構造物は現在、研究開発段階であり、様々な形式が検討されている。例えば図 1 に示すセミサブ、スパーが代表的な構造形式である。これらの構造形式は、海洋構造物や船舶などで発展した技術を応用して製造することが可能である。鋼材においても同様に各分野で発展した技術が応用展開できる。

浮体式の洋上風力発電設備では電気事業法、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」⁵⁾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っており、例えば日本海事協会鋼船規則 K 編船体用圧延鋼材が用いられる。表 3、表 4 に一例として日本海事協会鋼船規則 K 編船体用圧延鋼材である KA/KD/KE32、KA/KD/KE36 の化学成分と機械的特性⁶⁾について示す。

表 3 鋼船規則 K 編船体用圧延鋼材の化学成分の例（板厚 100mm 以下）

	脱酸形式	化学成分 (mass%)						
		C	Si	Mn	P	S	その他	炭素当量
KA32, KD32, KE32	細粒キルド	≤0.18	≤0.50	0.90- 1.60	≤0.035	≤0.035	Cu, Cr, Ni, Mo, Al,	Ceq ^{e)} ≤ 0.36
KA36, KD36, KE36	細粒キルド	≤0.18	≤0.50	0.90- 1.60	≤0.035	≤0.035	Nb, V, Ti 規制あり	Ceq ^{e)} ≤ 0.38

e) $Ceq = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V) / 5 + (Ni + Cu) / 15$

表 4 鋼船規則 K 編船体用圧延鋼材の機械的特性の例 (板厚 50mm)

	機械的特性			
	耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	衝撃試験の最小平均吸収エネルギー値 (J)	伸び (%)
KA32, KD32, KE32	≥315	440-590	L:31, T:21	≥22
KA36, KD36, KE36	≥355	490-620	L:34, T:24	≥21

シャルピー試験片採取方向： L 圧延方向, T 圧延方向と直角方向

KA/KD/KE32 と KA/KD/KE36 は化学成分の制限は同じだが、炭素当量の制限は、KA/KD/KE32 が $C_{eq} \leq 0.36$ であり、KA/KD/KE36 が $C_{eq} \leq 0.38$ と異なる。引張強さは、KA/KD/KE32 が 440-590MPa、KA/KD/KE36 が 490-620MPa である。耐力は KA/KD/KE32 が ≥ 315 MPa であり、KA/KD/KE36 が ≥ 355 MPa である。シャルピー衝撃値はそれぞれ KA32 と KA36 は試験温度 0°C、KD32 と KD36 は試験温度 -20°C、KE32 と KE36 は試験温度 -40°C の値であり、L 方向と T 方向とで要求値が異なる。

4. 洋上風力に用いられる厚鋼板の製造技術

洋上風力発電のタワーや支持構造物に用いられる厚鋼板は規格では焼入れ・焼戻し (Quenching and Tempering) や焼きならし (Normalizing) など熱処理にて製造することも可能だが、より優れた溶接性を得るために TMCP (Thermo Mechanical Control Process) により製造される場合がある。図 3⁷⁾ に示すように TMCP (加工熱処理または熱加工技術) とは主に制御圧延 (Controlled Rolling) と加速冷却 (Accelerated Cooling) を組み合わせた製造プロセスのことであり、1980 年代に日本の鉄鋼各社が世界に先駆けて実用化した技術⁸⁾ である。従来の圧延まま (As Rolling)、焼きならし (Normalizing) や古典的制御圧延 (Controlled Rolling) プロセスを適用した HT50 と比較して、TMCP では極めて微細な金属組織 (図 4) が得られ、同一成分で 100MPa 程度強度アップすることが可能である⁹⁾。これにより高強度鋼でも溶接部の硬さを低減でき、溶接性を飛躍的に向上することが可能となった (図 5)⁷⁾。現在ではほぼ全分野に TMCP が適用されており、例えば、マイナス 40°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¹⁰⁾、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¹¹⁾ が開発されている。

上述したように洋上風力発電に用いられる厚鋼板の板厚は厚手が多くなるため、溶接の高能率化や溶接継手の高性能化が求められる。TMCP 技術の適用に加えてピン止め粒子による γ 粗大化抑制技術¹²⁾ や粒内変態促進技術¹³⁾ を利用した溶接熱影響部 (HAZ) 細粒化による高靱化技術が有効である。このような HAZ 細粒化技術を利用して、建築分野では高能率な大入熱溶接 (溶接入熱 100kJ/mm 超) が適用可能な建築用鋼材¹⁴⁾、船舶分野では脆性破壊発生抑制及び亀裂伝播停止性能に優れた大型コンテナ船用鋼材^{15) 16)} などが開発されており、洋上風力発電向けへの応用展開が期待される。

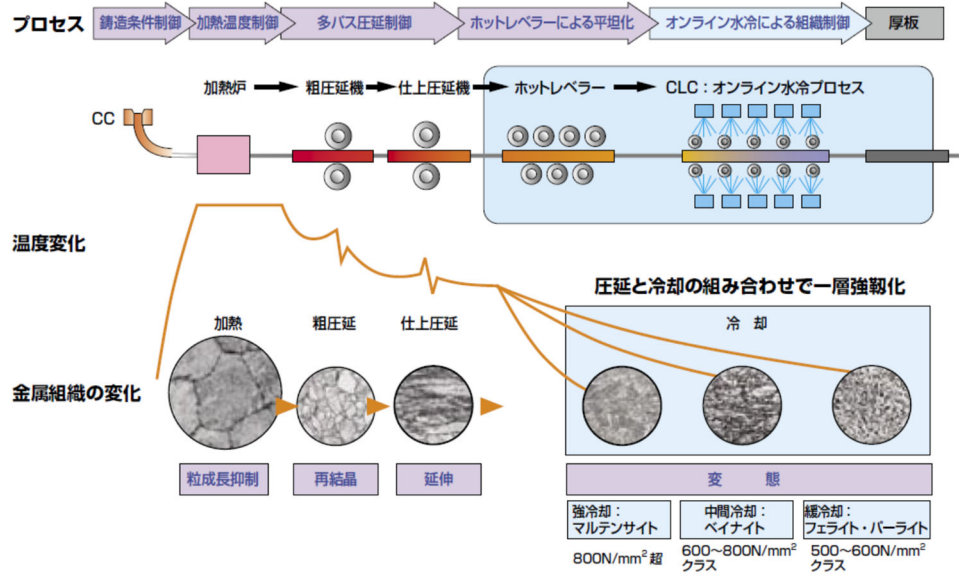


図3 TMCP技術の概要

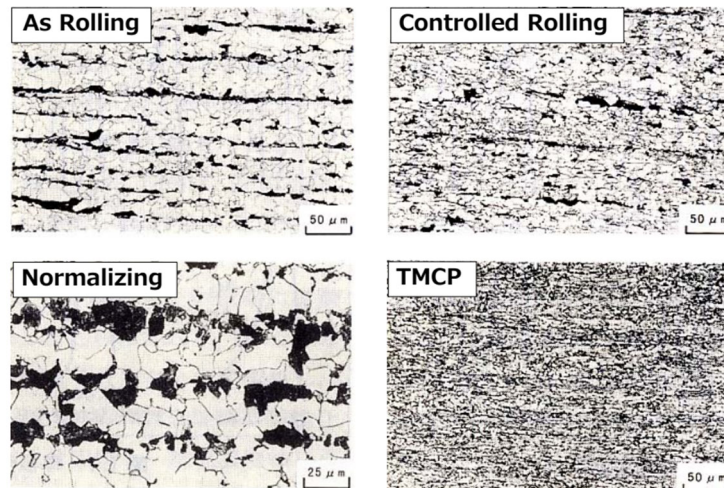


図4 製造プロセスによる金属組織の違い

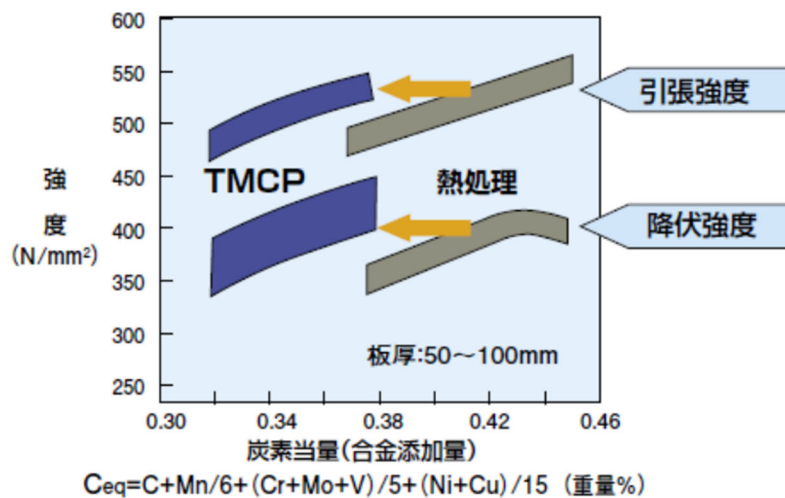


図5 TMCP適用によるメリット

5. 洋上風力発電用鋼材およびその利用技術

洋上風力発電の普及にはコスト削減が大きな課題であり、とりわけ浮体支持構造物の大量生産技術、運転保守コストの低減が課題である¹⁷⁾。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、耐疲労ソリューションについて以下で紹介する。

セミサブ形式の支持構造物を想定した福島沖プロジェクト¹⁸⁾では、高能率溶接とそれに対応した鋼材の適用可能性が検討された。

表 5 供試鋼と溶接条件

	鋼材規格	板厚(mm)	溶接条件		
			溶接プロセス	溶接姿勢	溶接入熱 (kJ/mm)
D1	KD36-TM	25	FCuB 溶接	下向き	16
D2		25	エレクトログラス溶接	立向き	10
EA1	KE36-TM	40	FCuB 溶接	下向き	31
EA2		40	サブマージアーク溶接	下向き	12
EB1		50	エレクトログラス溶接	立向き	28

表 5 に示すように日本海事協会鋼船規則 K 編船体用圧延鋼材である高張力 TMCP 鋼の KD36-TM (板厚 25mm) と KE36-TM (板厚 40mm と 50mm) が供試鋼として用いられた。図 6¹⁹⁾ に示すように HAZ 高靱化技術 (HTUFF[®])¹⁴⁾ が適用された KE36-TM 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) がマイナス 20℃以下となっており優れた靱性が確保可能であることが示された。欧州では海洋構造物用の鋼材と溶接技術が用いられており、溶接入熱 3kJ/mm 程度の小入熱溶接が適用されているが、これに対して大入熱溶接 (溶接入熱 20kJ/mm) を用いた場合ではアークタイムが 86%削減可能となる (図 7)¹⁹⁾。

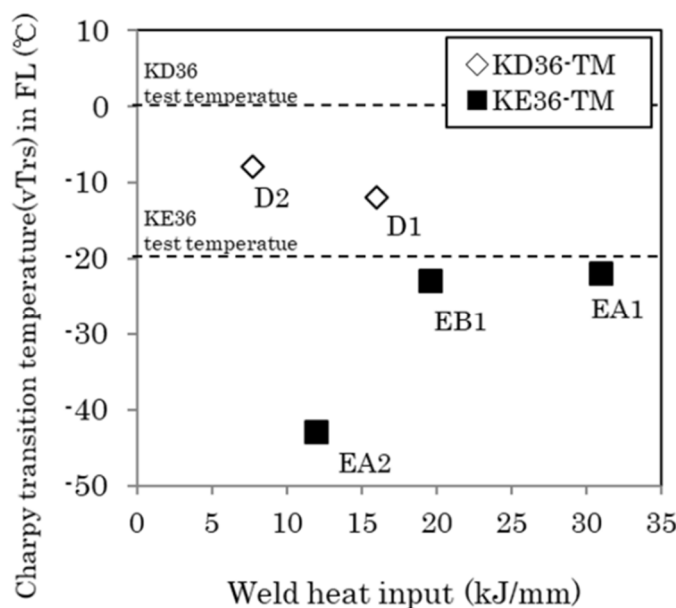


図 6 溶接継手のシャルピー試験結果

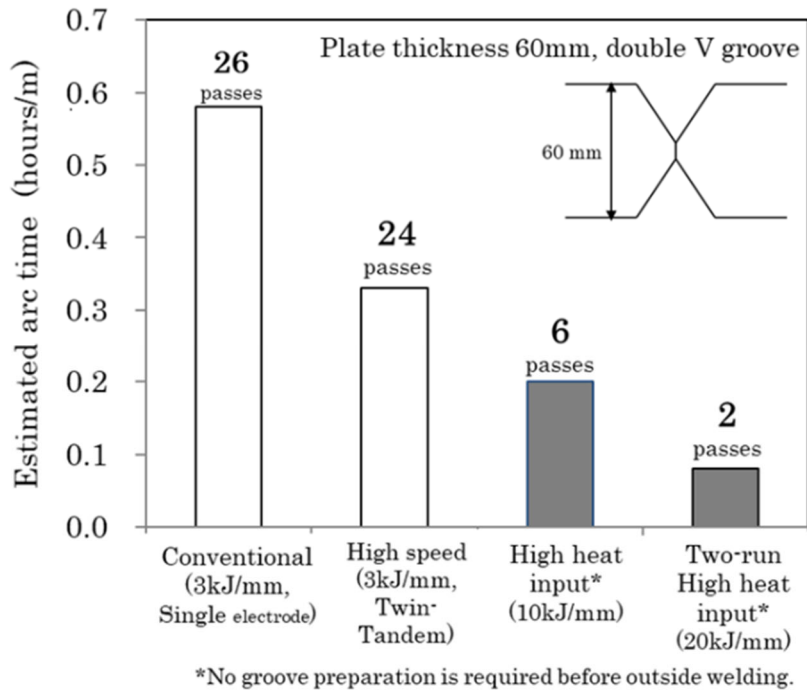


図7 各種溶接のアークタイム比較

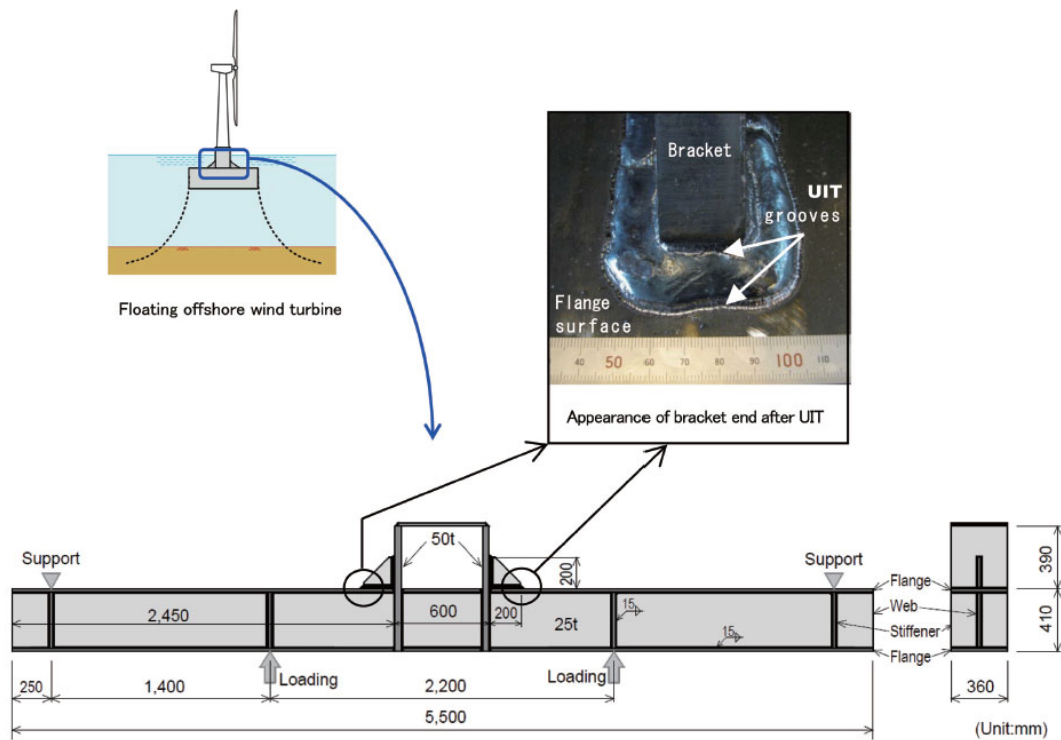


図8 大型構造モデル疲労試験体

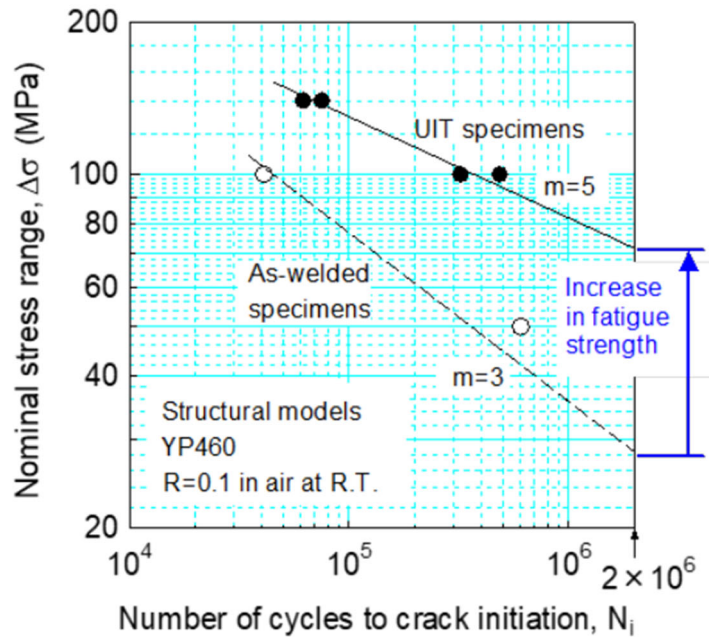


図9 大型構造モデル疲労試験体の疲労特性

浮体式洋上風力発電設備は、同じく洋上で使用される船舶とは異なり、ドックでの定期補修ができないことから、耐久性がより厳しく求められる。特に風やローターの振動による外力が加わるため高い耐疲労性能が必要となる。一方で風車の大型化に伴い高強度鋼材の適用が検討されているが、鋼材を高強度化しても溶接部の疲労強度は向上しないのが一般的である。そこで、近年、船舶や橋梁で適用が進んでいる UIT (Ultrasonic Impact Treatment) ²⁰⁾ の適用が検討されている。供試鋼を YP460MPa 級鋼として、浮体とタワー基部の接合部に設けるブラケット溶接部を想定した大型構造モデル (図 8¹⁹⁾) による疲労試験が行われた。図 9¹⁹⁾ に示すように溶接ままの試験体に比べて UIT 後の試験体の方が高疲労強度かつ長疲労寿命であり、 2×10^6 回時間強度で 2 倍以上の効果が得られた。

6. 洋上風力発電設備で用いられる様々な鋼材

洋上風力発電設備は、風車、タワー、支持構造物 (基礎)、送電設備で構成されており、これまで説明した厚鋼板以外にも様々な鋼材が使用される ²¹⁾。例えば、風車のナセル内部では、ベアリング、シャフト、増速機用歯車用の棒鋼、発電用の電磁鋼板が必要であり、風車とタワー、タワーと支持構造物を接続するための高張力ボルトが必要である。さらに、維持管理コストを低減するためには、耐食性に優れた様々な鋼材が有効な場合がある ^{22) 23) 24)}。今後、腐食環境や施工コストなど様々な因子を考慮して適切な鋼材や施工方法を検討する必要がある。

浮体式洋上風力発電においては浮体の位置を固定するための係留索が必要であり、これらには鋼製チェーンや鋼製高張力ケーブルが必要であり、様々な実証研究 ^{25) 26)} がおこなわれている。さらにコンクリート製浮体では、プレストレストコンクリートを導入する鋼線 ²⁷⁾ が用いられる。このように洋上風力発電構造物では多種多様な高品質鋼材が必要となる。

7. まとめ

日本政府が掲げる目標を達成するには、今後、大型の洋上風力発電設備を短期間で大量に低コストで製造、設置する必要がある。また洋上風力発電設備では過酷な環境下で長期間にわたり安定した稼

働率、ならびに高い安全性を確保することが求められる。これらを実現するため本報で紹介した高性能で高品質な鋼材およびその利用技術の展開が期待される。

参考文献

- 1) 本間竜一：洋上風力発電設備に適した厚板とそれを支える技術, JSSC (日本鋼構造協会誌), 50,9-11 (2022) .
- 2) Effects of Microstructure and Texture on DWTT Properties for High Strength Line Pipe Steels
経済産業省：洋上風力発電設備に関する技術基準の統一解説,
https://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/oshirase/2018/03/300330.html
(参照日 2024.6.20)
- 3) JIS G 3106：2008,溶接構造用圧延鋼材
- 4) 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
- 5) 国土交通省：浮体式洋上風力発電施設技術基準,
https://www.mlit.go.jp/maritime/maritime_fr6_000006.html (参照日 2024.6.20)
- 6) 日本海事協会：鋼船規則 K 編,2023
- 7) 新日本製鐵：強靱な鉄で社会を支える厚板 (2) , Nippon Steel Monthly, 169,10 (2007) .
- 8) 東田幸四郎,山崎喜崇,松本和明,長嶺多加志,平部謙二,有方和義：厚鋼板へのオンライン加速冷却 (OLAC) の適用 (OLAC の実用化に関する研究 第1報) , 鉄と鋼,67 (4) ,S340 (1981)
- 9) 尾上泰光,梅野正紀,萬谷興亜,十河泰雄,酒井和夫,岩永健,森川博文：調質冷却による高品質厚板新製造法 (CLC プロセス) の開発, 製鉄研究. (309) ,18 (1982)
- 10) Yoshida, Y., Tamehiro, H., Chijiwa, R., Funato, K., Doi, N., Tanaka, K., Kibe, M.: Production of high strength TMCP steel plate for offshore structures, Proceedings of the 12th Int. Conf. OMAE. Glasgow, 1993, ASME.
- 11) Hara, T., Shinohara, Y., Asahi, H., Terada, Y., Doi, N.: Effects of Microstructure and Texture on DWTT Properties for High Strength Line Pipe Steels, Proceedings of International Pipeline Conference. Calgary, 2008, ASME.
- 12) 金沢正午,中島明,岡本健太郎,金谷研：微細 TiN による溶接ボンド部靱性の改善と大入熱溶接用鋼の開発, 鉄と鋼,61, 2589 (1975)
- 13) Chijiwa, R., Tamehiro, H., Hirai, M., Matsuda, H., Mimura, H.: Extra High Toughness Titanium-Oxide Steel Plates for Offshore Structures and Line Pipe, Proceedings of the 7th Int. Conf. OMAE. Houston, 1988, ASME.
- 14) 児島明彦,植森龍治,皆川昌紀,星野学,市川和利：微細粒子による溶接熱影響部の組織微細化技術『HTUFF』を適用した厚鋼板の開発, まてりあ,42,67 (2003)
- 15) 大谷潤, 船津裕二, 井上健裕, 白幡浩幸, 廣田一博, 松本和幸, 矢島浩：超大型コンテナ船用厚手高靱性鋼 YP47 の開発-1, 日本船舶海洋工学会講演会論文集,11,55 (2010)
- 16) 白幡浩幸,大谷潤,船津裕二,井上健裕：溶接部の脆性き裂発生特性の向上：超大型コンテナ船用厚手高靱性鋼 YP47 の開発 (2) , 日本船舶海洋工学会講演会論文集,11,59 (2010)
- 17) 経済産業省：洋上風力の産業競争力強化に向けた技術開発ロードマップ,
https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/yojo_furyoku/sagyo_bukai/003.html
(参照日 2024.6.20)

- 18) 石原孟：福島沖浮体式洋上ウィンドファーム実証研究の現状と将来展望，日本風力エネルギー学会誌,36, 553 (2013) .
- 19) 本間竜一,萱森陽一,井上健裕,獅々堀明,大川鉄平,西村誠二：福島沖浮体式洋上ウィンドファームの実証研究における洋上風力発電用鋼板及び疲労ソリューション，新日鉄住金技報, 400,52 (2014) .
- 20) 野瀬哲郎：疲労強度向上向け超音波ピーニング法，溶接学会誌,77,210 (2008) .
- 21) 川田裕之，本間竜一，加茂孝浩，米澤隆行，金子道郎，久積和正，小杉知佳，奥島基裕，武川啓之：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，日本製鉄技報. (422) ,83-93 (2023)
- 22) 菅江清信,上村隆之,安藤隆一,都築岳史：塗装周期延長耐食鋼（CORSPACE®）の開発と実用化，新日鉄住金技報, (400) , 79-85 (2014)
- 23) 松永修平, 片山翼, 佐藤弘隆, 木村文映, 関口太郎：耐海水性ステンレス鋼被覆による海洋鋼構造物の防食技術，日本製鉄技報. (416) ,154-159 (2020)
- 24) 及川雄介, 柘植信二, 江目文則, 本村洋, 井上裕滋：構造用素材として優れたコストパフォーマンスを持つ省合金型二相ステンレス鋼（NSSC®2120）の開発，まてりあ.55 (2) ,70-72 (2016)
- 25) 大久保寛, 小泉飛鳥, 大嶽敦郎, 菅野雅彦, 林伸幸, 鈴木三樹雄, 八木健太郎：福島浮体式洋上ウィンドファームの係留システムについて～係留チェーンの耐久性評価と係留設計法～，日鉄エンジニアリング技報.13,20-38 (2022)
- 26) 鳥井正志, 山崎伸介, 佐々木信博, 大久保寛, 山下篤, 堺浩二, 岩本力：浮体式洋上風力発電施設の係留システム開発～海洋向け高張力ケーブルを適用した新たな浮体係留システムの提案～，日鉄エンジニアリング技報.6,18-27 (2015)
- 27) 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.

<略歴>

本 間 竜 一 (ほんま りゅういち)

2002年 大阪大学大学院工学系研究科生産科学コース修了
 2002年 新日本製鐵株式会社（現日本製鉄株式会社） 入社
 技術開発本部 鉄鋼研究所 接合研究センター 配属
 2022年 大阪大学大学院 工学研究科 博士（工学） 取得
 2022年 日本製鉄株式会社 技術開発本部 東日本技術研究部
 鋼材研究室 厚板・形鋼・鋼管研究課 課長
 現在に至る