UDC 621 . 311 . 24 : 669 . 14 . 018 . 292 : 539 . 43

技術論文

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

Steel Plates and Fatigue Solution for Offshore Wind Turbines in Fukushima Floating Offshore Wind Farm Demonstration Project

本 間 竜 一* Ryuichi HOMMA
萱 森 陽 一 Yoichi KAYAMORI
井 上 健 裕 Takehiro INOUE
獅 々 堀 明 Akira SHISHIBORI
大 川 鉄 平 Teppei OKAWA
西 村 誠 二 Seiji NISHIMURA

抄 録

日本の沿岸は水深が深く，風力発電比率向上のためには浮体式洋上風力発電が必要である。経済産業省は，浮体式洋上風力で日本が世界の最先端に立つことを目指し，福島沖“浮体式洋上ウィンドファーム実証研究事業”を立ち上げた。新日鐵住金(株)は，大入熱溶接用 TMCP 鋼及び疲労ソリューション（UIT）の浮体への適用に関する検討を担い，それらが溶接効率の向上及び長疲労寿命化に寄与することを確認した。

Abstract

Floating offshore wind farms are essential for increasing the efficiency of wind power generation in Japan because ocean areas that have high wind potential are spread over Japan's deep-sea areas. The Ministry of Economy, Trade and Industry in Japan (METI) launched the Fukushima Floating Offshore Wind Farm Demonstration Project in 2012. The aim of this project is to strengthen Japan's competitive position in the global wind farm market. Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation participated in the project, and demonstrated that both TMCP steel plates for large heat input welding and UIT technology for solving the problems associated with fatigue are useful in offshore wind turbine structures.

1. 緒 言

風力発電は再生可能エネルギーとして太陽光発電と並ぶ有望な発電方法である。風力発電の設置場所は，陸上と洋上があり，特に洋上は一般的に風速が強く乱れが小さいことから風力発電に適している。

欧州で着床式の洋上風力の設置に力をいれているのは，沿岸から 100 km 離れているところでも水深が 60 m 以下の海域があるなど，遠浅な海域が多くあるためである。海に囲まれている日本においても，洋上風力は今後の発展に大きな期待が寄せられているが，水深が深い海域が殆どのため浮体式洋上風力の実用化が不可欠である。

新日鐵住金(株)は 2011 年度から，丸紅(株)（プロジェクトインテグレータ），東京大学（テクニカルアドバイザー）を中心とした 10 社とともにコンソーシアムを組んで経済産業省から“浮体式洋上ウィンドファーム実証研究事業[1]”（略称：FORWARD。以下，本研究）の委託を受け，研究に取り組んでいる。

浮体式風力発電自体は既にノルウェーやポルトガルで発電能力 2MW 級のもので実証研究が始まっていたが，本研究は複数の浮体式洋上風車と浮体式洋上変電所からなるウィンドファームとして世界初のものである。さらに，２期工事では発電能力が世界最大級の 7MW 級の搭載を予定するなど，日本が浮体式洋上風力の技術で世界の最先端に立つために極めて重要なものである。

本報では，本研究の概要と新日鐵住金の研究課題の内の大入熱溶接用 TMCP（Thermo Mechanical Control Process, 熱加工制御）鋼と疲労ソリューションの適用に関する検討結果について紹介する。

2. 実証研究の概要

実証研究では，**図 1**[1] に示すように第 1 期（2011 年度～

* 君津技術研究部 主幹研究員 千葉県君津市君津 1 番地 〒 299-1141

2013 年度）と第２期（2014 年度～ 2015 年度）に分かれ，第１期では 2MW のダウンウィンド型浮体式洋上風力発電設備１基（“ ふくしま未来 ”）と 22kV から 66kV に昇圧する世界初となる浮体式洋上変電設備（“ ふくしま絆 ”）の設置，第２期では 7MW 級の浮体式洋上風力発電設備２基を設置予定である。

表１[1] にコンソーシアムのメンバーと役割を示す。新日鐵住金は高性能鋼材の開発を担当することとなっており，以下の４つのテーマに取り組んでいる。

①洋上風力発電用高張力鋼（以下ハイテン鋼）に関する実証研究（おもに，大入熱溶接用 TMCP 鋼による溶接効率向上）

②疲労ソリューションの適用に関する実証研究（おもに，米国 U.I.T., L.L.C. 社が有する Ultrasonic Impact Treatment（UIT）技術による溶接部の疲労強度向上等）

③係留用チェーンの適用に関する実証研究（高強度材適用による耐摩耗性，耐疲労性の向上の検討等）

④耐食鋼ソリューションの実証研究（おもに，各種ステンレス鋼の曝露試験）

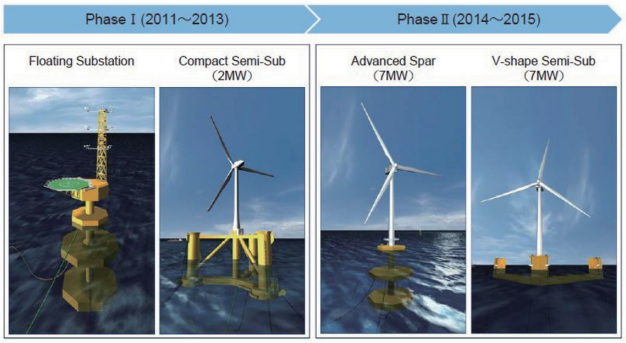


図１　実証研究の概要 [1]
Scope of Fukushima FORWARD project

3.　大入熱溶接用TMCP鋼

一般的に陸上風力発電に比べて，洋上風力発電の支持構造物のコストは高いが，着床式では，水深が深くなるほど支持構造物が大型化するため，今後支持構造物のコストはさらに増大すると考えられる [2]。代表的な構造形式であるモノパイルやジャケットは，近年の風車の大型化を背景として，厚手材（板厚 40mm 超）の使用割合が増加する傾向である。一方，浮体式では，海洋構造物や造船の技術を応用したスパー型やセミサブ型が検討されており，着床式と同様に大型風車を搭載する場合，重要構造部位では厚手材が適用される。したがって，今後，大型風車が大量に設置されていくなかで，厚手材の溶接施工コスト低減，すなわち溶接の高能率化は，着床式，浮体式にかかわらず洋上風力発電を普及させる上で解決すべき重要な課題である。

これまで海外における洋上風力発電分野では，高速化 [3]，狭開先化 [4] により，溶接の高能率化が進められてきた。一方，日本では，造船，建築等の分野において，溶接パス数を大幅に削減可能な大入熱溶接法が，高能率，施工管理が容易な溶接法として多くの実績を有する [5]。ただし，入熱量が大きくなると，溶接熱影響部（HAZ）では，高温での保持時間が長くなることに加えて，冷却速度が遅くなることから結晶粒が粗大化し，洋上風力分野で要求される 0℃～ −40℃の低温での靱性を確保することが極めて難しくなる。新日鐵住金では，このような状況においても，高温で熱的に安定な超微細ナノ粒子により HAZ 組織の粗大化を抑制する技術 HTUFF®（エイチタフ：High HAZ Toughness Technology with Fine Microstructure Imparted by Fine Particles）[6-8] を有しており，本技術を適用した大入熱溶接用 TMCP 厚鋼板を着床式洋上風力基礎に展開を始めている [9]。

本研究では，大入熱溶接用 TMCP 厚鋼板の浮体式洋上

表１　コンソーシアム・メンバーと役割 [1]
Project member and Main role

FORWARD member	Main role
Marubeni Corporation [Project integrator]	Feasibility study, Approval and licensing, O & M, Collaboration with fishery industry
The University of Tokyo [Technical adviser]	Metocean measurement and prediction Technology, Marine navigation safety, Public relation
Mitsubishi Corporation	Coordination for grid integration, Environmental impact assessment
Mitsubishi Heavy industries, Ltd.	V-shape semi-sub(7MW)
Japan Marine United Corporation	Advanced Spar, Floating Substation
Mitsui Engineering & Shipbuilding Co., Ltd.	Compact Semi-sub(2MW)
Nippon Steel & Sumitomo Metal	Advanced steel material
Hitachi Ltd.	Floating Substation
Furukawa Electric Co., Ltd.	Large capacity undersea cable
Shimizu Corporation	Pre-survey of ocean area, Construction technology
Mizuho Information & Research institute, Inc	Documentation, Committee Operation

風力発電システムへの適用に向けて，想定される大入熱溶接における溶接継手特性を調査した。

3.1 実験方法

供試鋼材は，浮体の主要部位に洋上風力発電用として適用が想定される NK 船級船体用高張力鋼（ハイテン鋼）KD36-TM，KE36-TM とした。KD36-TM は TiN を利用した従来の高 HAZ 靭性鋼であるのに対し，KE36-TM は前述の HTUFF 技術を適用した高 HAZ 靭性鋼である。適用部位での最大板厚及び溶接施工方法を考慮し，一般部材用として KD36-TM は 25mm 厚，重要構造部材用として KE36-TM は 40mm 厚と 50mm 厚の厚手材２種類の計３種類とした。目標特性，供試鋼の化学成分を表２，表３にそれぞれ示す。溶接は，浮体の製造に適した高能率溶接方法３種類（片面サブマージアーク溶接法（以下 FCB），エレクトロガス溶接法（以下 EGW），サブマージアーク溶接法（SAW））を適用した。本研究で適用した溶接方法の一覧を表４に示す。

溶接継手の特性は原則として NK 鋼船規則 M 編に準拠してマクロ試験，引張試験，衝撃試験により評価した。マクロ試験では欠陥の有無や溶接の良否を判断した。引張試験は溶接線と垂直な方向に U2A 号試験片を採取し，衝撃試験は，溶接線と垂直な方向から V ノッチシャルピー試験片（JIS Z 2242）を採取した。板厚方向の試験片採取位置は図２に詳細を示す。

表２　目標特性
Target properties

Steel standard	:	KD36-TM, KE36-TM
Tensile properties	:	YP ≧ 355MPa, TS 490-620MPa
Thickness	:	25-50mm
Test temperature of Charpy impact test	:	KD36-TM: −20°C in base metal, 0°C in welding joint KE36-TM: −40°C in base metal, −20°C in welding joint
Welding method	:	FCB, EGW, SAW
Maximum welding heat input	:	10-31 kJ/mm

表３　開発鋼の化学成分（mass%）
Chemical compositions

No.	Steel standard	Thicness (mm)	C	Si	Mn	P	S	Others	Ceq
A	KD36-TM	25	0.13	0.22	1.18	0.011	0.003	Nb, Ti	0.33
B	KE36-TM	40	0.11	0.29	1.30	0.010	0.002	Nb, Ti	0.33
C	KE36-TM	50	0.12	0.29	1.31	0.008	0.002	Nb, Ti	0.34

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

表４　溶接方法
Welding methods

No.	Steel standard	Thicness (mm)	Welding conditions		
			Position	Welding process	Heat input
A1	KD36-TM	25	Flat	FCB	16 kJ/mm
A2			Vertical up	EGW	10-11 kJ/mm
B1	KE36-TM	40	Flat	FCB	31 kJ/mm
B2			Flat (two-run welding)	SAW	12 kJ/mm
C1	KE36-TM	50	Vertical up	EGW	28 kJ/mm

3.2 実験結果及び考察

表５に供試鋼の機械的特性を示す。目標の強度，伸び，靱性をいずれも満足しており，良好な値である。

図３に各溶接方法の代表的な継手の断面マクロ組織写真を示す。全ての溶接継手は十分な溶け込みを有しており，き裂，溶け込み不足，融合不良，その他の有害とみられる欠陥は認められなかった。

表６に各溶接継手の引張試験結果を示す。供試鋼材の溶接継手はいずれも引張強さの規格値（TS：490-620MPa, NK 鋼船規則 K 編）を満足しており，かつ母材で破断していることから，十分な継手引張強さを有している。

図４に各溶接継手のシャルピー衝撃試験結果を示す。いずれも各規格値（NK 鋼船規則 M 編）を満足しており，十分な衝撃特性を有している。

図５に溶接継手の代表的なミクロ組織を示す。いずれの溶接継手も良好なミクロ組織を示しているが，特に HTUFF

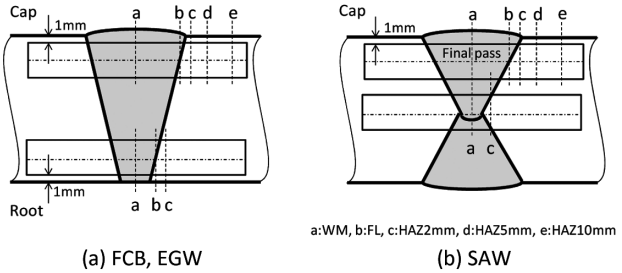
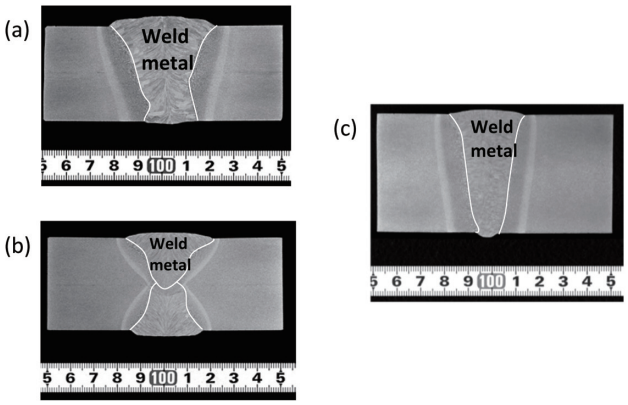


図２　継手シャルピー試験片の採取位置とノッチ位置
Sampling of test specimens from welded joints

表５　供試鋼の機械的特性
Mechanical properties of developed steel plates

No.	Steel standard	Thicness (mm)	Tensile test				Charpy impact test		
			Direction, location	YP (MPa)	TS (MPa)	EL (%)	Direction, location	Temp. (°C)	vE Min./Ave. (J)
A	KD36-TM	25	T, 1/4t	419	527	24	L, surface	−20	291/310
B	KE36-TM	40	T, 1/4t	429	557	28	L, surface	−40	256/272
C	KE36-TM	50	T, 1/4t	409	539	27	L, 1/4t	−40	271/299

T: Transverse direction, t: Thickness, YP: Yield point, TS: Tencile strength, EL: Elongation, L: Longitudinal direction



(a) FCB, B1, (b) SAW, B2, (c) EGW, C1

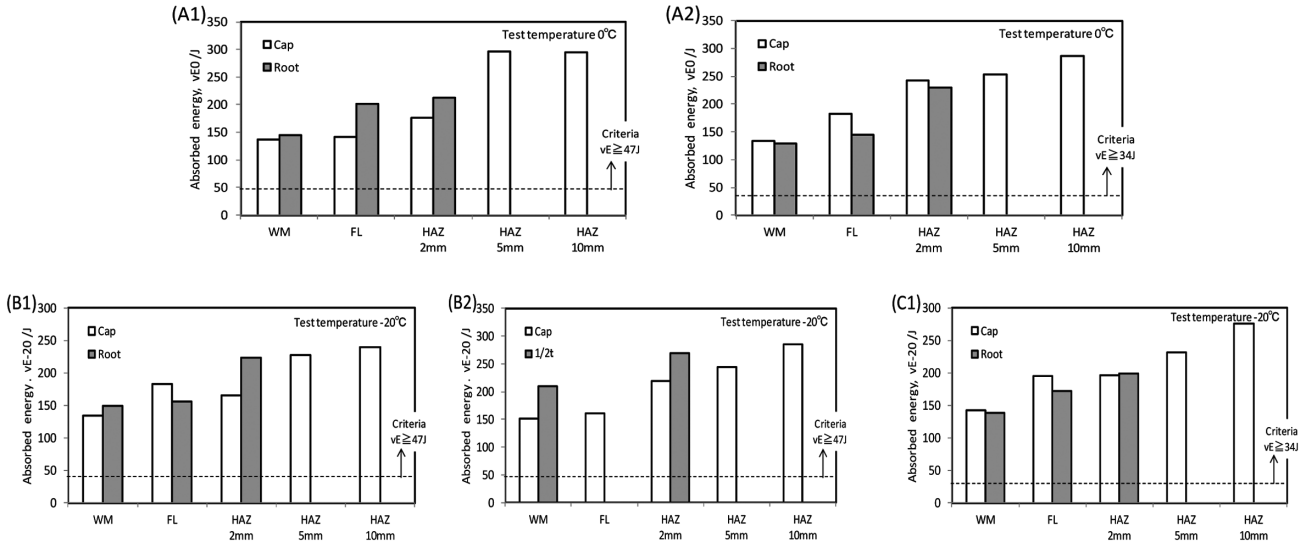
図３　溶接継手の断面マクロ写真
Macroscopic appearances of welded joints

鋼である KE36-TM の融合部（FL：Fusion Line）近傍では顕著に旧γ粒の粗大化が抑制されており，その後の冷却中に生成する粒界フェライトやベイナイトの粗大化も抑制されることが確認できた。

図６に継手で最も衝撃特性が劣化しやすい Root 側（図２

表６　溶接継手の引張試験結果
Results of welded joint tensile tests

No.	Steel standard	Tensile strength (MPa)	Fracture position
A1	KD36-TM	540	Base metal
A2	KD36-TM	561	Base metal
B1	KE36-TM	533	Base metal
B2	KE36-TM	565	Base metal
C1	KE36-TM	577	Base metal
Class NK M	–	490-620	–



(A1) KD36-TM, FCB, (A2) KD36-TM, EGW, (B1) KE36-TM, FCB, (B2) KE36-TM, SAW, (C1) KE36-TM, EGW

図４　溶接継手のシャルピー衝撃試験結果
Charpy impact toughness of welded joints

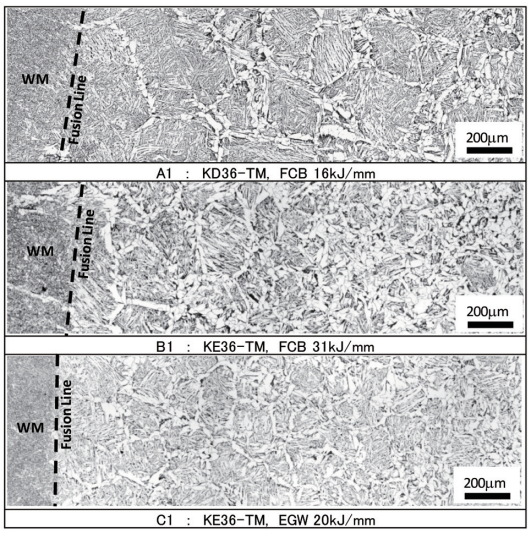


図５　溶接継手 FL 近傍のミクロ組織
Microstructures of welded joints

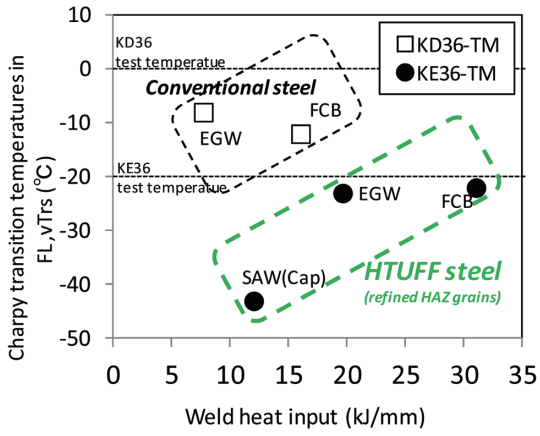


図６　FL のシャルピー破面遷移温度（vTrs）と溶接入熱との関係
Relationship between Charpy vTrs in FL (Root) and weld heat input

(a)参照) の FL での破面遷移温度（vTrs）を鋼種毎に示す (X 開先の SAW は Cap 側 (図２(b)参照) を示す)。いずれの鋼種でも vTrs が評価温度以下で十分な衝撃特性を有していることが確認できることに加え，従来鋼（TiN 鋼）の KD36-TM より，HTUFF 鋼の KE36-TM の方が全体的に良好な vTrs が得られる傾向が確認できた。両鋼のベース成分に殆ど差がないことや，HAZ のミクロ組織は KD36-TM の方が細粒であることを踏まえると，HTUFF 技術による HAZ 組織の粗大化抑制効果が継手の良好な vTrs に大きく寄与したと考えられる。

3.3 大入熱溶接適用のメリット

溶接施工効率に対する大入熱溶接の改善効果を検討した。図７は洋上風力基礎で通常用いられる SAW の X 開先を想定して，全厚を溶接するのに要するアークタイム（1m あたり）とパス数を試算した結果である。モノパイル基礎製造で一般的なツインワイヤーの１電極 SAW を基準にすると，高速 SAW でもある程度の効果が得られるが，入熱 10kJ/mm へ大入熱化すると，アークタイムが 66％削減可能となり，さらに入熱 20kJ/mm では，アークタイムが 86％削減できる。加えて，実際の溶接作業では無視できない準備作業の時間に関しても，大入熱溶接では，内面溶接後の外面溶接前に行う開先の加工が不要で，パス毎に行う付帯作業も削減できるなどのメリットが得られる。したがって，大入熱溶接用 TMCP 鋼適用は，溶接施工全体を大幅に高効率化することが可能であることがわかった。

3.4 小活

本研究において，洋上風力発電用ハイテン鋼を浮体式洋上風力発電システムへ世界初適用するための実証データを採取することを目的に５種類の鋼板に浮体の製造に適した大入熱溶接を適用し，溶接継手特性を調査した。その結果，全ての溶接継手がいずれの評価においても十分な特性

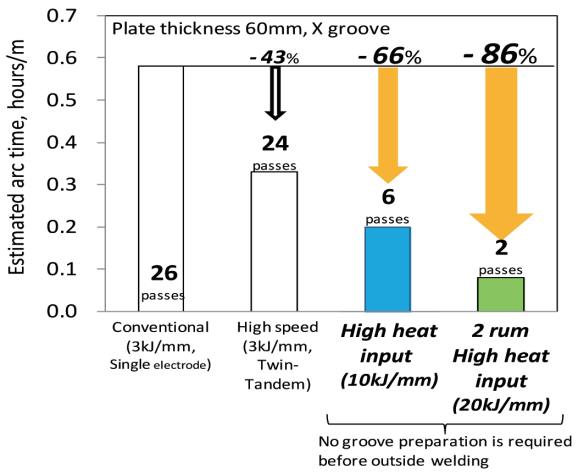


図７　大入熱溶接法のアークタイム削減効果
Advantages of high heat input SAW in arc time

を有していることが明らかとなった。特に HTUFF 鋼である KE36-TM では大入熱化しても安定した HAZ 靭性が得られることがわかった。また洋上風力基礎で一般的な高速 SAW 法に対して，溶接入熱の大入熱化が溶接施工の高効率化に大きな効果を有することがわかった。

4. 疲労ソリューションの適用に関する検討

浮体式洋上風力発電システムでは，一般的な浮体構造物が受ける波浪による変動外力に加え，風力発電に固有の風やローターの振動などにより変動外力が重畳する。その結果，使用鋼材には広い周波数範囲の複雑な繰り返し応力が作用するため，形状不連続部や溶接接合部などの応力集中部に対して十分な耐久性を満足する疲労設計が求められる。一方で，浮体式洋上風力発電の大型化に資する技術の一つが使用鋼材のハイテン化であるが，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，ハイテン化のメリットを最大限に活かすために有用となる技術が，溶接部の疲労強度向上を狙った疲労対策技術（以下，疲労ソリューションと称す）である。

溶接部の疲労特性を向上させるソリューションとしてグラインダー処理や化粧溶接などは，船舶や橋梁などで検討，実適用されているが，その効果は主に溶接止端部の形状改善により応力集中を低減するものである。一方，最近船舶や橋梁において適用の進んでいる UIT は，溶接部の形状改善のみならず残留応力や鋼組織の改善にも寄与するもので，優れた疲労特性向上効果が認められている [10-17]。これまで UIT 適用部の疲労特性は，溶接継手試験片や船舶，橋梁などの溶接構造物 [12-16] に対して検討されており，新たな溶接構造物となる浮体式洋上風力発電を対象としていなかった。浮体式洋上風力発電では，前述のような複雑な繰返し応力が発生する上，アクセスが困難な場合が多く，メンテナンスコストを抑えるためにも高い耐疲労特性が要求されている。

そこで本研究では，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検討対象部位とし，洋上風力発電用ハイテン鋼を用いて製作した模擬構造体で UIT による対象部位の疲労特性向上効果を明確化することとした。

4.1 実験方法

4.1.1 供試鋼板

現在浮体構造には降伏応力 355MPa 級ハイテン鋼が使用されているが，将来的に軽量化，製作負荷軽減が想定されており，より高強度である降伏応力 460MPa 級を供試鋼とした。表７に供試鋼板（板厚 25mm，50mm）の化学成分と機械的性質を示す。

表７　大型構造モデル疲労試験用 YP460 鋼板
YP460 steel plates used for large-scale structural fatigue specimens

Thickness (mm)	Chemical compositions (%)					Mechanical properties		
	C	Si	Mn	P	S	Yield stress (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
25	0.09	0.29	1.51	0.013	0.002	564	623	20
	0.09	0.29	1.51	0.012	0.002	584	657	19
50	0.10	0.05	1.42	0.009	0.004	527	620	19

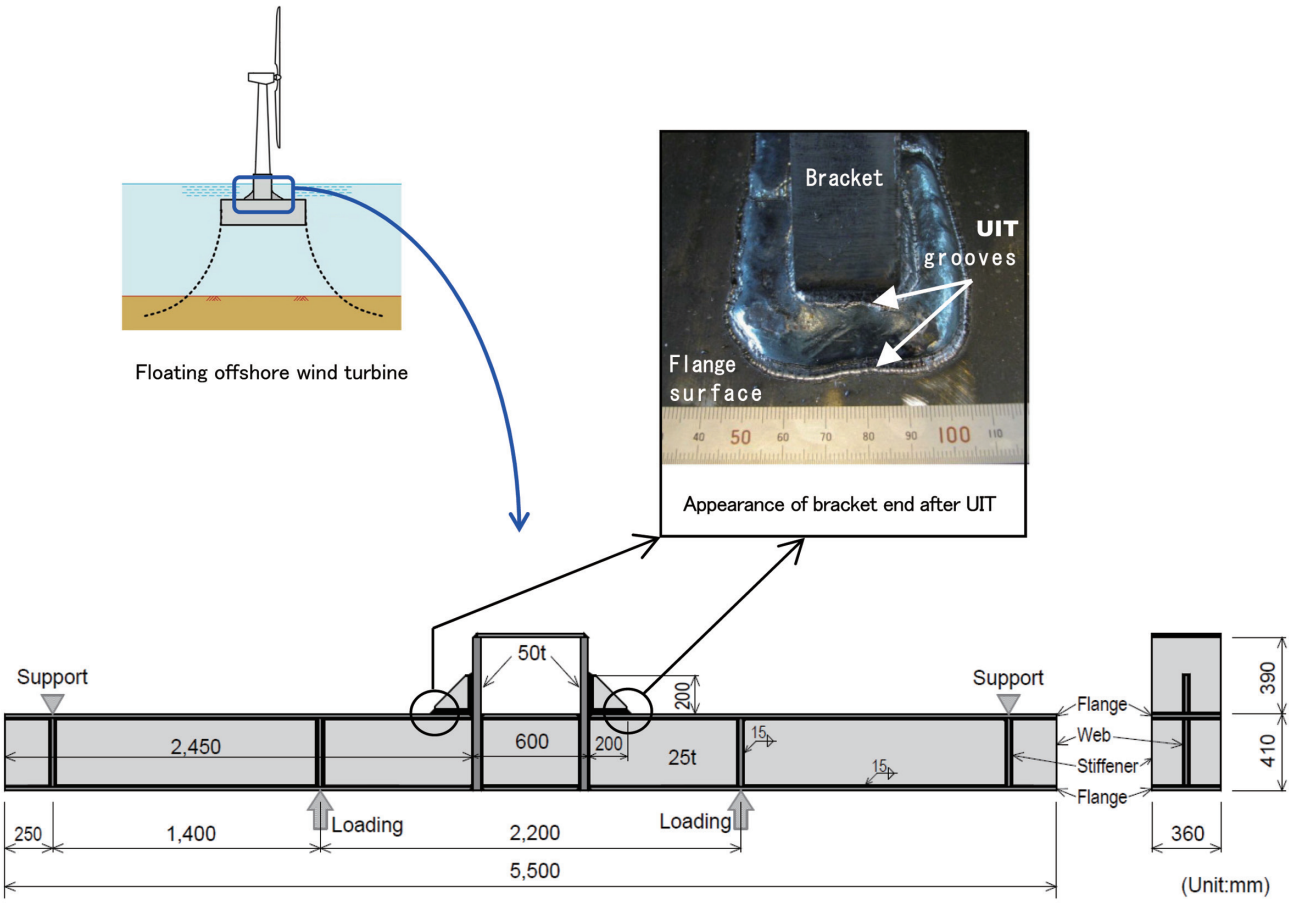


図８　大型構造モデル疲労試験体
Large-scale structural fatigue specimen

4.1.2 大型構造モデル疲労試験体

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疲労想定部位とし，浮体を水平部材，タワー基部を垂直部材で模擬した大型構造モデル疲労試験体を設計した（図８）。水平部材は上下フランジ，ウェブ，スチフナーから成るＩ断面の横桁，垂直部材は左右の仕切り板を横桁に貫通させ上端を水平な板で繋ぐ構造とし，全長 5500 mm の四点曲げ試験体を製作した。溶接はフラックス入りワイヤーを用いたガスシールドアーク溶接で，シールドガスは CO_2，ワイヤーは引張強さ 590 MPa 級高張力鋼用とした。いずれの溶接も造船で一般的に採用されている隅肉溶接とした。試験体は計４体製作し，そのうち２体はブラケット端角回し溶接部を溶接まま（AW）で，残りの２体は同ブラケット端角回し溶接の水平部材側，ブラケット側両方のビード止端部に UIT を施した。

また，４体の全ての大型構造モデル疲労試験体に対して，角回し溶接部を除く溶接止端部全てに疲労き裂が発生しないように UIT を施した。UIT には米国 Applied Ultrasonics 社製 ESONIX® 27 UIS を用いた。共振周波数は 27 kHz で，打撃ピン直径を 3 mm，先端曲率半径を 3 mm とした。

4.1.3 疲労試験

大型構造モデル疲労試験には荷重容量 2.5 MN の電気油圧式大型疲労試験機を用いた。梁の四点曲げ弾性計算により中央２点間のフランジ表面の公称応力 σ を算出し，その変動範囲（公称応力範囲）$\Delta\sigma$ を各２試験体で異なる２水準に設定した。疲労試験は室温大気中で行い，波形は正弦波，応力比 R = 0.1 の片振り疲労試験とし，周波数 f = 0.5 ～ 1.0 Hz で制御した。試験体のブラケット端角回し溶接部の水平部材と接するビード止端部あるいは UIT 打撃跡中心

より5mm離れた位置に単軸弾性ひずみゲージを貼り付け，疲労試験中に計測される左右どちらかのひずみが5%低下した際に疲労試験機を止めた。染色浸透探傷法でビード止端部もしくはUIT処理部の疲労き裂発生を確認した上で，疲労き裂発生寿命N_iとした。

4.2 実験結果及び考察

得られた$\Delta\sigma$とN_iの関係を図9に示す。UIT試験体はAW試験体よりも高疲労強度で長疲労寿命の傾向を示した。なお，UIT試験体では一方のブラケット溶接部に疲労き裂が発生した後，その部分を補修溶接して他方のブラケット溶接部の疲労試験を継続することで，1体の試験体で2点の実験点を得た。また，各試験体のS-N曲線をフィッティングするには十分な実験点数とは言えないため，本研究では，DNV-PR-C203[18]の疲労設計曲線を参考にS-N曲線の傾きmを決定した。即ち，評価部に引張残留応力が作用するAW試験体ではm = 3，圧縮残留応力の効果でmがAW試験体よりも大きくなることが知られている[17] UIT試験体ではハンマピーニングのm = 5を用いた。その結果，いずれの試験体もほぼ実験点に沿うS-N曲線となり，低応力範囲側でUITの大きな疲労特性改善効果が示唆された。

設計者による実際の疲労照査においては，大型構造モデル試験体の実験点ではなくオーソライズされた疲労設計曲線を用いることになるが，疲労設計曲線の指標として用いられることの多い2×10^6回時間強度で本実験結果を評価すると，UIT試験体はAW試験体の2倍以上の疲労強度となる。従って，船舶，橋梁のみならず洋上風力発電の浮体構造においても，UITによる疲労強度の著しい向上が期待できる。

4.3 小括

本研究では，浮体式洋上風力発電の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対象部位とし，その疲労特性に及ぼすUITの効果を大型構造モデル疲労試験体で検討した。その結果，溶接ままの試験体よりもUIT後の試験体の方が高疲労強度かつ長疲労寿命となった。疲労設計曲線の目安となる2×10^6回時間強度で比較すると，UITによる疲労強度の向上は2倍以上となり，浮体式洋上風力発電の溶接構造体において，UITによる疲労特性の大幅な向上が期待できる。

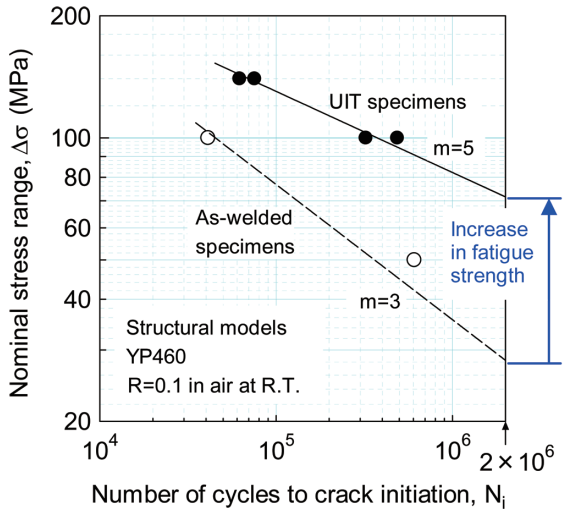


図9　大型構造モデル疲労試験体の疲労特性
Fatigue properties of large-scale structural specimens

5. 結　　言

本報では，福島沖浮体式洋上ウィンドファームの実証研究の概要と大入熱溶接用TMCP鋼及び疲労ソリューションの適用に関する検討結果を紹介した。大入熱溶接用TMCP鋼については，浮体式洋上風力発電への適用を想定した大入熱溶接条件で評価した結果，十分な特性を有していることを明らかにした。また，疲労ソリューションの適用については，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検討対象部位とし，洋上風力発電用ハイテン鋼にて製作した大型構造モデル疲労試験体にUITを適用することで疲労特性が大幅に向上することを明らかにした。これらの技術を浮体式洋上風力に適用することにより，建造効率の向上及び構造物寿命の延長が期待でき，洋上風力発電の普及，拡大に大きく貢献できると考える。

参照文献

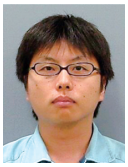
1) 石原孟：福島復興　浮体式洋上ウィンドファーム実証研究事業 パンフレット．2012
2) 石原孟：産業と環境．6，35 (2011)
3) Gehring, M.: Welding in the World. 52, 545-550 (2008)
4) 中澤博志，長崎肇：溶接学会誌．79 (7)，22 (2010)
5) 例えば，笹木聖人，須田一師，元松隆一，橋場裕治，大北茂，今井嗣郎：新日鉄技報．(380)，13 (2004)
6) 児島明彦，植森龍治，皆川昌紀，星野学，市川和利：まてりあ．42，67 (2003)
7) 児島明彦，清瀬明人，植森龍治，皆川昌紀，星野学，中島隆雄，石田浩司，安井洋二：新日鉄技報．(380)，2 (2004)
8) 皆川昌紀，石田浩司，船津裕二，今井嗣郎：新日鉄技報．(380)，6 (2004)
9) Homma, R., Hoshino, M., Nakashima, K., Shishibori, A., Kojima, K., Nishimura, S., Bockelmann, M.: Proc. of EWEA Offshore 2013. 2013, p. 104
10) Statnikov, E. S.: Comparison of Post Weld Deformation Methods for Increase in Fatigue Strength of Welded Joints. IIW Doc. XII-1668-97, 1997
11) Haagensen, P. J., Statnikov, E. S., Lopez-Martinez, L.: Introductory Fatigue Tests on Welded Joints in High Strength Steel and Aluminium Improved by Various Methods including Ultrasonic Impact Treatment (UIT). IIW Doc. XIII 1748-98, 1998

12) 島貫広志，野瀬哲郎：構造モデル試験体の疲労特性に及ぼす超音波衝撃処理の効果．溶接学会全国大会講演概要．Vol.81，2007，p. 342
13) 野瀬哲郎，島貫広志：重ね継手の疲労寿命に及ぼす超音波ピーニングの影響に関する実験および解析．日本機械学会論文集 A 編．74 (737)，166-167 (2008)
14) 島貫広志，大川鉄平，野瀬哲郎：溶接構造シンポジウム 2009 講演論文集．2009，p. 479-482
15) Mori, T., Shimanuki, H., Tanaka, M.: Effect of UIT on Fatigue Strength of Web-gusset Welded Joints Considering Service Condition of Steel Structures. Welding in the World. 56, 141-149 (2012)
16) Okawa, T., Shimanuki, H., Funatsu, Y., Nose, T., Sumi, Y.: Effect of Preload and Stress Ratio on Fatigue Strength of Welded Joints Improved by Ultrasonic Impact Treatment. Welding in the World. 57, 235-241 (2013)
17) 島貫広志，田中睦人：UIT による溶接構造物の疲労亀裂発生抑制技術の活用．新日鉄住金技報．(400)，(2014)
18) Det Norske Veritas: Fatigue Design of Offshore Steel Structures. DNV-RP-C203, 2011

本間竜一　Ryuichi HOMMA
君津技術研究部　主幹研究員
千葉県君津市君津1番地　〒299-1141

獅々堀明　Akira SHISHIBORI
厚板事業部　厚板技術部　厚板技術室　主幹

萱森陽一　Yoichi KAYAMORI
鉄鋼研究所　材料信頼性研究部
主幹研究員　PhD



大川鉄平　Teppei OKAWA
大分技術研究部　主任研究員　工博

井上健裕　Takehiro INOUE
鉄鋼研究所　材料信頼性研究部
上席主幹研究員　PhD

西村誠二　Seiji NISHIMURA
厚板事業部　厚板技術部　厚板商品技術室
上席主幹