

# 浮体式洋上発電構造物と適用鋼材

## — 福島浮体式洋上ウインドファームにおける実証研究

石原 孟 東京大学 萱森 陽一 新日鐵住金株式会社

### 1 福島浮体式洋上ウインドファーム実証研究事業の概要

東日本大震災からの復興のために、福島県は再生可能エネルギーを中心とした新たな産業の集積・雇用の創出を実施している。日本の風力発電は、陸上平野部に適地が減少し、山間部では土木工事のコスト負担が増加していることから、長い海岸線を生かした洋上風力発電の導入が期待されている。欧州とは異なり、日本の急峻な海域の特性上、浅海域に適する着床式のみならず、浮体式の研究開発が求められている。

このような状況の中、本実証事業は福島沖で世界に先駆けた浮体式洋上風力発電所の実現を目指し、2012年2月に国家プロジェクトとして開始された。

本実証事業は、丸紅株式会社(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)、三菱重工業株式会社、三菱造船株式会社、ジャパンマリンユナイテッド株式会社、三井E&S造船株式会社、新日鐵住金株式会社、株式会社日立製作所、古河電気工業株式会社、清水建設株式

会社およびみずほ情報総研株式会社の各社で構成された福島洋上風力コンソーシアムにより推進されている。

厳しい気象・海象条件の中、2013年10月に世界初の浮体式洋上変電所および2MW風車を1年半という世界に類のない速さで完成した。その後7MW風車、5MW風車を順次設置し、2016年2月に風車3基と変電所1基の合計4基で構成された本格的な浮体式洋上風力発電所が、予定通り完成した。写真1は5MW風車から実証事業全景を展望した写真である。

本実証研究事業では、世界初の取り組みとして、浮体式洋上ウインドファームの実証、世界最大級の風車の浮体への搭載および浮体式洋上変電所の設置を行った。また、複数タイプの浮体式洋上風力発電設備の性能評価手法の開発をはじめとして、浮体式洋上風力観測手法の開発、66kVの大容量ライザーケーブルの開発、腐食および疲労に強い高性能鋼材の開発および厳しい環境条件下の建設に向けた施工技術開発等様々な技術開発を行った。

現在、本実証研究事業では維持管理を行うとともに、浮体式洋上風力発電システム全体の安全性・信頼性・経済性について検証を行っている。将来福島沖のみならず、日本および海外において浮体式洋上風力発電事業の導入拡大に貢献することが期待されている。

本稿では、大型洋

上風力発電構造物の建造効率の向上および長寿命化に資する技術として、取り組んだ洋上風力発電用鋼板と疲労ソリューションの実証研究の成果について紹介する。

### 2 洋上風力発電用鋼板と疲労ソリューションの実証研究

#### 2.1 大入熱溶接用TMCP鋼

洋上風力発電の浮体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。従って、今後、大型風車を大量に効率よく建造・設置してゆくために、厚手材の溶接施工コスト低減、すなわち溶接の高効率化は重要な課題である。高能率、施工管理が容易な溶接法として、日本の船舶や建築等の分野において大入熱溶接法が多くの実績を有する<sup>1)</sup>。ただし、入熱量が大きくなると、溶接熱影響部(HAZ)では結晶粒が粗大化し、低温靱性が低下する。

そこで本実証研究では、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®(High HAZ Toughness Technology with Fine Microstructure Imparted by Fine Particles)<sup>2~4)</sup>を適用した大入熱溶接用TMCP(Thermo-mechanical Control Process、熱加工制御)厚鋼板を供試し、洋上風力発電の浮体構造で想定される様々な大入熱溶接に対して継手特性を調査した。

図1に最も靱性が劣化しやすい溶接融合部(FL:Fusion Line)の破面遷移温度( $\sqrt{Tr_s}$ )を鋼種ごとに示す。ここで、KD36-TMはTiNを利用した従来の高HAZ靱性鋼で、KE36-



写真1 実証事業全景

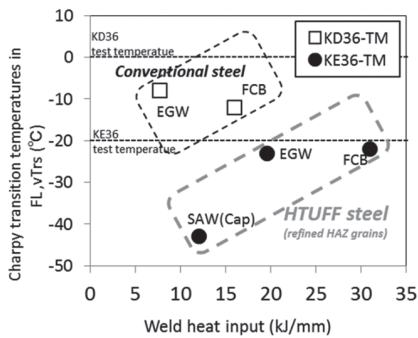


図1 FLのシャルピー破面遷移温度 (vTrs) と溶接入熱の関係

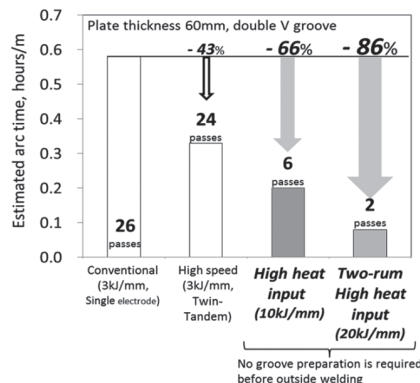


図2 大入熱溶接法のアークタイムとパス数削減効果

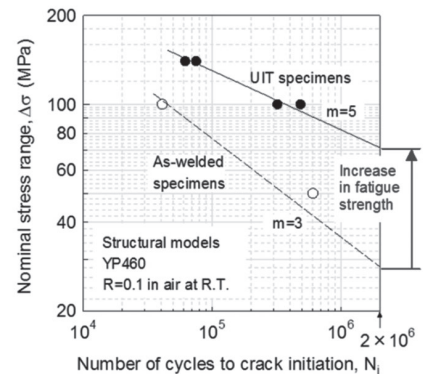


図3 浮体模擬構造体の疲労特性

TMはHTUFF技術を適用した高HAZ靱性鋼である。いずれの鋼種でもvTrsが評価温度以下であり、十分な特性を有していることに加え、従来鋼よりもHTUFF鋼の方が良好なvTrsとなることが確認できた。

また、図2は洋上風力基礎で通常用いられるサブマージアーク溶接法(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例である。モノパイル基礎製造で一般的なツインワイヤの1電極SAWと比較して、高速SAWでもある程度の効果が得られるが、大入熱化するとさらに大幅な高効率化が期待できる。

## 2.2 疲労ソリューション

洋上風力発電の浮体構造物には変動外力が作用する。そのため、形状不連続部や溶接接合部などに対して疲労設計が求められる。一方、浮体式洋上風力発電を大型化するために高強度鋼(ハイテン鋼)を使用したくても、一般的に、溶接部の疲労強度はハイテン化で向上しない。そのため、疲労対策技術(疲労ソリューションと称す)が有用となり、その1つが超音波衝撃処理(UIT: Ultrasonic Impact Treatment)である。近年、UITの適用性が船舶や橋梁分野で検討されている<sup>5,6)</sup>が、風力発電分野では未検討であった。そこで本研究事業では、降伏応力460MPa級の洋上

風力用ハイテン鋼を用いて浮体模擬構造物を製作し、その疲労試験を行うことで、UITによる疲労特性向上効果を検証することとした。

得られた公称応力範囲( $\Delta\sigma$ )と疲労き裂発生寿命( $N_i$ )の関係を図3に示す。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であり、UITにより疲労特性の大幅な向上が期待できる結果となった。

## 3 おわりに

本稿では福島浮体式洋上ウィンドファーム実証研究事業の概要に触れ、その成果の中から洋上風力発電用鋼板と疲労ソリューションの実証研究について紹介した。これらの技術を適用することにより、洋上ウィンドファームの普及・拡大に大きく貢献できると考える。

### 謝辞

本研究は、経済産業省の委託業務「福島・浮体式洋上ウィンドファーム実証研究事業」で得られた研究成果である。ここに記して関係者の皆さまに感謝の意を表す。

### (参考文献)

- 1) 笹木聖人等: 高能率2電極エレクトロガスアーク溶接法の開発、新日鉄技報No.380、2004
- 2) 児島明彦等: 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(1)、日本金属学会、2003
- 3) 児島明彦等: 微細粒子によるHAZ細粒高靱化技術「HTUFF」の開発、新日鉄技報No.380、2004
- 4) 皆川昌紀等: 大型コンテナ船用大入熱溶接対応降伏強度390MPa級鋼板、新日鉄技報No.380、2004
- 5) 島貫広志等: 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No.81、2007
- 6) Mori T. et al.: Effect of UIT on fatigue strength of web-gusset welded joints considering service condition of steel structures, Welding in the world 56、2012



東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻教授  
日本風力エネルギー学会会長  
福島洋上風力コンソーシアム  
テクニカルアドバイザー

**石原 孟**

(いしはら たけし)

### (略歴)

- 1992年 東京工業大学理工学研究科 博士(工学)
- 1992年 清水建設株式会社 入社
- 2000年 東京大学大学院工学系研究科 助教授
- 2008年 同上教授
- 2018年 現職



新日鐵住金株式会社  
鉄鋼研究所  
厚板・形鋼研究部  
破壊力学グループ総括  
主幹研究員

**萱森 陽一**

(かやもり よういち)

### (略歴)

- 1994年 筑波大学大学院修了
- 1994年 新日本製鐵(株) 入社
- 2007年 英国インペリアルカレッジ PhD
- 2018年 現職