

# 三井 造船 技報

平成 29 年 7 月 ■ 第 219 号

MITSUI ZOSEN TECHNICAL REVIEW No. 219 2017





## 表紙説明

### “ふくしま未来”

“ふくしま未来”は、経済産業省委託事業「平成23年度浮体式洋上ウインドファーム実証研究事業」において建設された浮体式洋上風力発電施設である。2 MW 風車を搭載しており、福島県沖の水深120 m、離岸距離約20 kmに設置されている。平成25年夏に設置が完了し、その冬には発電を開始した。三井造船は福島洋上風力コンソーシアムの中の1社として本実証研究事業に参画し、“ふくしま未来”の計画、設計、調達、建造、設置、メンテナンスを担当した。実証試験においては様々な貴重なデータを収集し、動揺する浮体の頂部に搭載された風力発電装置が陸上と同等の発電性能を発揮することを確認することができた。台風や落雷を経験したが、現在に至るまで大きな故障もなく順調に発電を継続している。“ふくしま未来”は同海域に設置された他の浮体式風力発電設備と共に、日本のみならず世界における浮体式洋上ウインドファームの先駆けとなることが期待されている。

- ① ふくしま未来
- ② 出渠
- ③ 落雷
- ④ 浮体へのアクセス
- ⑤ 暴風時状況

写真出典：福島洋上風力コンソーシアム

## Cover

### “Fukushima Mirai”

“Fukushima Mirai” is a floating offshore wind power plant installed at about 20 km off the coast of Fukushima prefecture. The water depth is about 120 m. The project was supported by Ministry of Economy, Trade and Industry as Fukushima Floating offshore Wind Farm Demonstration Project starting in FY2011. Installation of Fukushima Mirai was completed in the summer of 2013 and its operation started in the following winter. Mitsui Engineering and Shipbuilding Co., Ltd. as a member of Fukushima Offshore Wind Consortium, carried out engineering, procurement, construction, installation, and maintenance of Fukushima Mirai. During the field test valuable data have been obtained and it was found, as a result, that Fukushima Mirai is so stable in the sea that its wind turbine can have the same performance as a land based wind turbine. Although Fukushima Mirai has experienced typhoons and lightning struck, it has been keeping operation without major trouble since its completion. With other floating wind turbines in the demonstration project, Fukushima Mirai is expected as a pioneer wind farm in Japan as well as in the world.

- ① Fukushima Mirai
- ② Dockout
- ③ Lightning
- ④ Access to Fukushima Mirai
- ⑤ Fukushima Mirai in storm

Photo credit: Fukushima Offshore Wind Consortium

# 三井造船技報

2017年(平成29年)7月・第219号

## 目次

### 製品・技術解説

- 前処理設備を付加した新たな膜脱水分離プロセスの提案..... 1  
三井造船マシナリー・サービス株式会社 前川 和也

### 技術論文・報告

- 福島沖 2 MW 浮体式洋上風力発電実証事業の成果 ..... 6  
今北 明彦 長 拓治 神永 肇
- 発電機トルクの制御による風力発電装置の制振と出力平滑化の基礎検討..... 12  
小川 靖之 中田 成幸 小野 純二  
吉田 茂雄 梶原 宏之 朱 洪忠
- 追分橋耐震補強工事が完工  
- ロッキング橋脚を有する特殊橋梁の大規模地震対策 - ..... 17  
高田孝史朗 青山 智明
- 船用ディーゼル機関 架構へのピーニング処理の適用 ..... 25  
八木 伸暁 木村 陵介 長崎 俊憲 下野 大地
- 樹脂摺動部材の長寿命化に向けた DLC コーティング技術の開発 ..... 32  
滝澤 一樹 石原 修二 國次 真輔

### 製品・技術ニュース

- 桜島港フェリー施設の大規模改修(第1期)  
- 桜島港施設整備工事(その1) - ..... 39
- 働き方改革への対応を支援する“TIME-3X”の販売を開始  
- 強くて優しい会社づくり、はじまります。 - ..... 40

# MITSUI ZOSEN TECHNICAL REVIEW

No. 219 July 2017

## CONTENTS

### Products and Technology Explanation

- New Process of Membrane Dehydration Separation using Pretreatment System ... 1  
*Kazuya MAEKAWA*

### Technical Paper and Report

- Lessons from 2MW Floating Offshore Wind Turbine,“ Fukushima Mirai ”,  
in Fukushima Demonstration Project ..... 6  
*Akihiko IMAKITA, Takuji CHYO, Hajime KAMINAGA*
- Fundamental Study on Wind-Turbine Control Methods to Achieve both of  
Power Smoothing and Drive Train Damping ..... 12  
*Yasuyuki OGAWA, Shigeyuki NAKADA, Junji ONO,  
Shigeo YOSHIDA, Hiroyuki KAJIWARA, Hongzhong ZHU*
- Seismic Reinforcement of“ Oiwake Bridge ”  
- Seismic Retrofit Works of the Bridge Supported with Rocking Columns - ... 17  
*Koshiro TAKATA, Tomoaki AOYAMA*
- Application of Peening to Frame Box of Marine Diesel Engine ..... 25  
*Nobuaki YAGI, Ryosuke KIMURA, Toshinori NAGASAKI, Taichi SHIMONO*
- Development of DLC Coating Techniques on Plastics for Improving Wear-Resistance ... 32  
*Kazuki TAKIZAWA, Shuji ISHIHARA, Shinsuke KUNITSUGU*
- Products and Technology News** ..... 39, 40



# 前処理設備を付加した新たな膜脱水分離プロセスの提案

三井造船マシナリー・サービス株式会社 前川 和也

## New Process of Membrane Dehydration Separation using Pretreatment System

Kazuya MAEKAWA

### 1. はじめに

三井造船マシナリー・サービス株式会社は、ディーゼルエンジン分野と産業機械分野の製品及びサービスを取り扱う三井造船の完全子会社である。本報で紹介するゼオライト膜分離技術は産業機械分野の主要製品のひとつである。三井造船は様々な産業で利用されるアルコールや有機溶剤から、省エネルギーで高効率かつ高い分離性能によって脱水を行う高性能膜分離技術として、NaA型ゼオライト膜を実用化し、1998年に最初のゼオライト脱水装置を納めた。それ以来このゼオライト膜分離技術は、洗浄乾燥用イソプロパノールや、医薬・香料用エタノール、その他各種化学分離プロセスにおける溶剤脱水処理に採用されている。特に京都議定書でCO<sub>2</sub>削減目標が定められて以降、バイオエタノールの精製プロセスでの脱水工程に非常に有効なプロセスとして国内外のプラントで数多く使用されている。中でもフィンランドでは、当社のゼオライト膜及び膜分離技術を用いた世界最大のバイオエタノール用脱水設備が稼動している。当社は2011年に三井造船から本事業の全面移管を受け、自社の製品として取り扱いを開始した。さらに2016年には世界のバイオエタノール市場への更なる拡販を目指し三菱ケミカル株式会社と本事業の業務提携を締結した。

NaA型ゼオライト膜分離技術は、溶剤からの脱水分離工程において、省エネルギー性が高く、また大きなスペースを必要とせず、かつ完全自動操作によりオペレーションが容易という利点を持つ技術である。特に水と共沸点を有する溶剤からの脱水において、大きな省エネルギー効果を生み出す。

実際の分離プロセスでの主要な課題は、脱水する溶剤系に継続的あるいは突発的に想定していない不純物が混入してくることである。その量や物性によってゼオライト膜の経年劣化の程度が変わる。通常、バイオエタノールでは2～3年の膜寿命が期待されている。これまで主成分のみであれば脱水可能な系でも、ある一つの不純物によって運用が難しくなったり、突発的な不純物混入によりNaA型ゼオライト膜が損傷を受け、膜寿命の短縮事例が発生したことがあった。今回、この不純物によるNaA型ゼオライト膜の短寿命化を軽減させる前処理設備を新たに開発したので紹介する。

### 2. 脱水膜分離技術の概要と課題

#### 2.1 ゼオライト膜による脱水機能

膜分離技術を適用したプロセスは、分離対象物の特性や分

子/粒子径と、各分離膜の特性との最適な組み合わせによって使用する膜が決定される。一般的に粒子径がマイクロ～ミクロ(約10.0～0.1mm)はマイクロフィルトレーション、ミクロ～低分子領域(分子量500000～1000)は限外ろ過・ナノフィルトレーション、高分子～低分子領域(分子量100000～1000)は透析、低分子領域以下(分子量1000～100や単分子)は電気透析・逆浸透・ガス分離・浸透気化、というように膜分離技術にはそれぞれ分離対象物に応じた応用範囲がある。

今回紹介するゼオライト膜は、分子レベルでふるい分けることができる浸透気化法又は蒸気透過法を用いた技術である。図1に溶剤から水を分離するときの透過イメージを示す。各分子に対する特有な吸着能を有するゼオライトを多結晶膜とし、その吸着能及び膜の供給側と透過側の蒸気圧差を透過駆動力として分離する。当社が扱うNaA型ゼオライト膜は水に対する吸着能が非常に高く、その特性を活かして溶剤からの脱水を得意とする脱水膜分離技術である。

#### 2.2 不純物が含有する実溶剤への膜脱水適用課題

ゼオライト膜分離は、特に共沸となる溶剤系において、蒸留分離と比較して分離に必要なエネルギーを小さくできる技術である。すなわち、精留塔の下流側にゼオライト膜分離を設置する。そして精留塔の塔頂濃度を共沸点付近までの分離にとどめ、残りの脱水を膜脱水分離にすることで、通常用いられる蒸留+PSA(Pressure-Swing-Adsorption)法よりも消費エネルギーを大きく削減することが可能である<sup>1)</sup>。

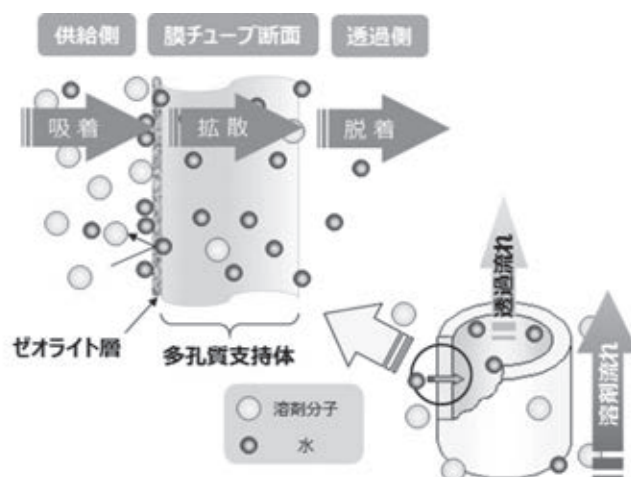


図1 ゼオライト膜の透過イメージ

しかし、実際の系ではほとんどの場合、0.1%未満の多数の不純物が含有されている<sup>2)</sup>。この場合の問題の一例を図2に示すバイオエタノール精製プロセスで説明する。バイオエタノールの分離濃縮の場合、塔頂濃度を下げれば必然的に不純物を払い出すためのサイドカットを設ける段数が塔頂に近くなり、結果塔頂流体に含まれる不純物濃度がわずかに増加する。NaA型ゼオライト膜分離は水のみ分離が可能であり、不純物は膜の選択分離性能低下や単位面積当たりの透過量低下(Flux低下)を引き起こす要因ともなる。

当社はこのような不純物が含まれる系での膜寿命保証を規定し、今日までバイオエタノール精製市場へ納入・展開を進めてきたが、近年蒸留技術の発展を受けてコストバランスの観点より更なる寿命保証延長を求められる機会が増加している。寿命延長のため、不純物留出を低減するために塔頂水分濃度をより下げた条件にすると、純粋なエタノール-水系での極小消費エネルギー運転条件から外れてしまう。このような背景からバイオエタノール市場への更なる展開のためには不純物による性能低下を低減する手段を得る必要があった。

そのほかの溶剤脱水系においても、主成分のみの場合には分離が可能な場合であっても、特に微量に酸が混入していれば膜が損傷し適用が難しくなる。このような溶剤でも膜分離プロセスを適用可能にし、膜分離技術の貢献範囲を拡大していく必要があった。

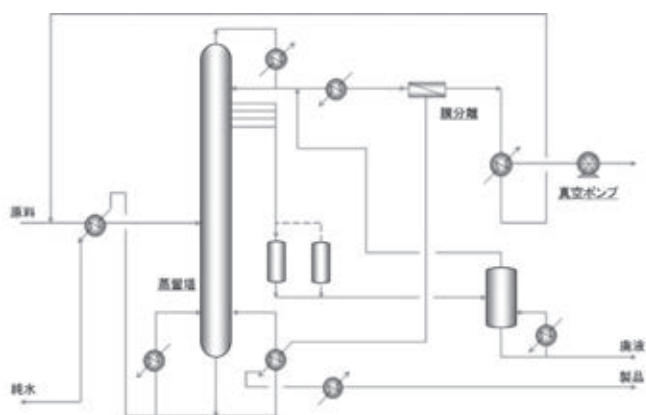


図2 蒸留+膜分離プロセス

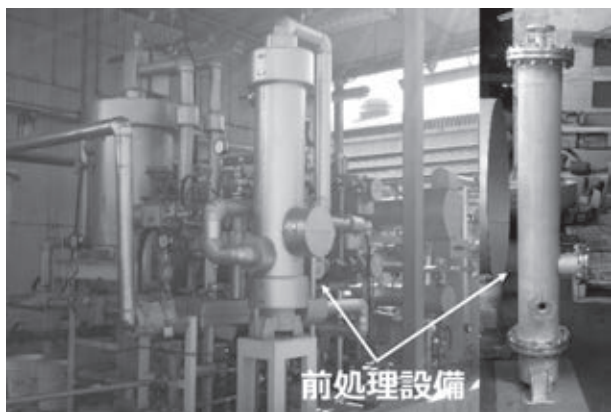


写真1 前処理装置及び導入後の脱水装置

### 3. 前処理設備による膜寿命の長期化

#### 3.1 前処理設備の概要

これら課題点を解決するため、今回膜脱水分離プロセスの前段に設置して膜劣化の影響を低減させる前処理設備を開発した。本前処理設備は、物質収支を考慮した容量と構造を有する容器と、その容器内部にゼオライト膜と同様の物質が含まれる粒子が充填された構造となっている。この前処理設備を被処理液が通過することで、膜への悪影響が低減することが期待できる。

#### 3.2 膜脱水プロセスへの前処理設備適用事例

解決の具体的実施例として、写真1に示す前処理設備を導入したゼオライト膜脱水装置を紹介する。この例では主にシュウ酸300から500ppmと微量の塩素という二つの不純物混入により膜劣化が起り、運転期間が約3ヶ月で製品の仕様から逸脱する状況となった。しかし、新しく開発した前処理設備を導入することにより、1年以上運転を継続しても順調に稼働している。

前処理設備導入前の本装置は、供給流体中に含まれる二つの不純物の影響を受け膜劣化が起きていた。写真2は膜交換時の膜の透過側チャンネル部分を示している。接液部が茶色に変色しており、ステンレス鋼材が腐食していることがうかがえた。

図3は、膜交換時に各膜モジュールから採取された使用済み膜の脱水性能試験結果である。本装置の膜モジュールは直列に配置されており、No.1とNo.4について性能を測定した。未使用と比較して最上流側であるNo.1モジュールから採取された膜は分離性能が大幅に低下し、その影響を受けて透過流束も大幅に増加していた。一方最下流側モジュールであるNo.4モジュールの性能は、No.1モジュールから採取した膜よりも劣化が低いものの、分離性能は使用前と比較して

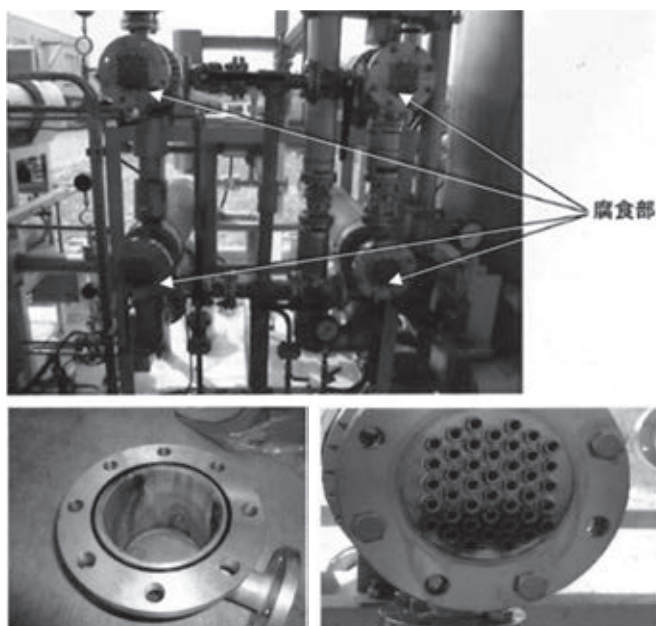


写真2 膜交換時の膜モジュールチャンネル部



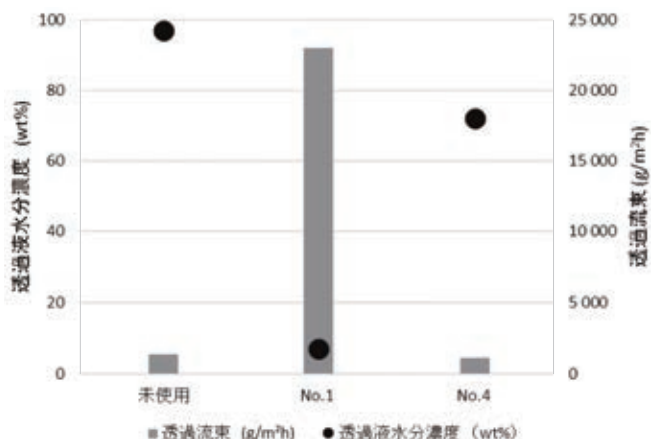


図3 前処理装置導入前の各モジュールにおける膜性能結果

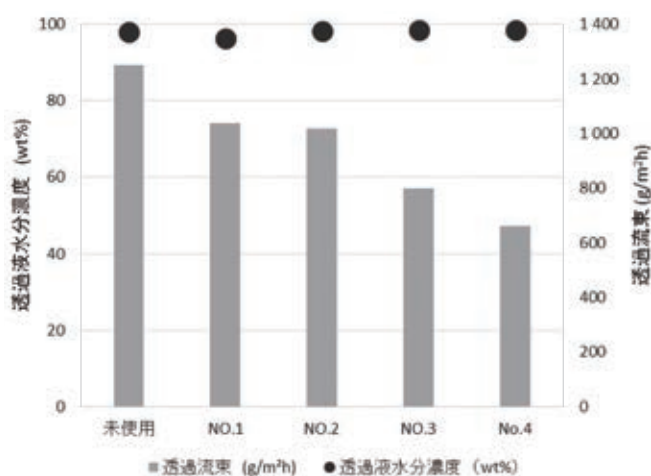


図4 前処理装置導入後の各モジュールにおける膜性能結果

20%ほど低下していることが確認できた。

これに対し、前処理設備を導入して7ヶ月後の採取した使用済み膜の性能試験結果を図4に示す。導入前のそれらと比較して導入後の膜性能は劣化が大幅に抑制されていることが確認できた。前処理設備の効果により膜性能が維持されていることが確認されたため、脱水装置は膜交換せずに継続して運転され、導入後1年後も膜性能は本装置仕様を満足する能力を有していた。結果として前処理設備が導入されたことにより、ゼオライト膜は実液を脱水する条件で約4倍の延命効果が確認された。

#### 4. 膜劣化と膜寿命延長メカニズムの推察

ゼオライト膜寿命を延長させるためには、まずどのような過程で劣化するのかを把握する必要がある。図1に示すゼオライト層は、一般的に高温高压下で薄膜状に形成される。その形成過程のモデルは提唱されているものの、実態は明らかでない。このゼオライト層形成過程と同じく、ゼオライト膜の膜劣化過程と膜寿命の延長メカニズムは明らかでないが、今回得られた幾つかの実験結果から次のように推察した。

##### 4.1 ゼオライト崩壊メカニズムの考察

NaA型ゼオライト膜は、高濃度の水分に膜が暴露される

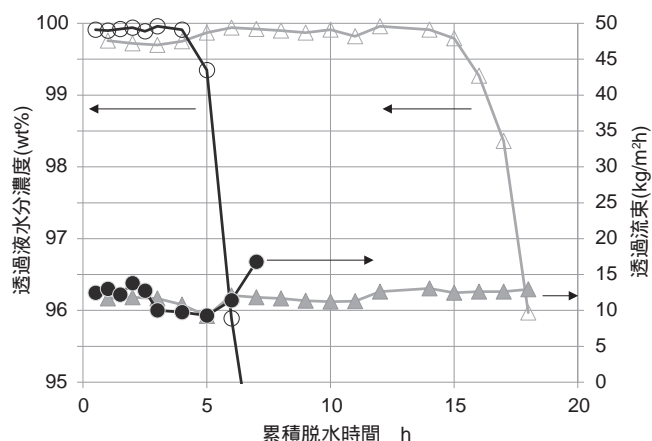


図5 各水分濃度における累積脱水時間と膜性能の関係

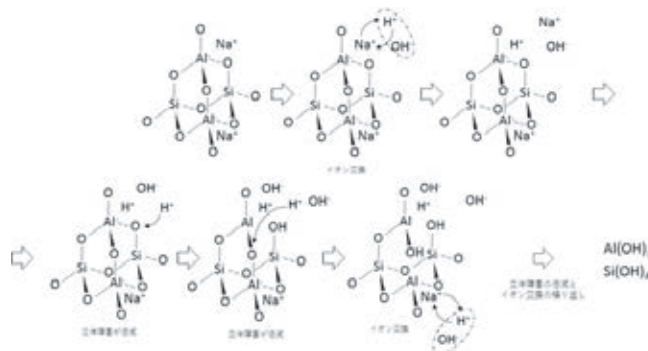


図6 NaA型ゼオライトの崩壊メカニズムイメージ

ことで膜崩壊が起きることが確認できており、高水分組成溶剤からの脱水には適さない。図5に60wt%と90wt%の水分を含む溶液からの脱水試験結果を示す。水分濃度が高い方が、分離性能が低下するまでの累積運転時間が短くなり、それと同時に透過流束が増加しているのが確認できる。

この結果を受けて、水による膜劣化のモデルは図6のように考察する。NaA型ゼオライトはAl, Si, O, Na元素からなる結晶性アルミノケイ酸塩であり、理想化学組成は $|\text{Na}^+_{12}(\text{H}_2\text{O})_{27}|_8[\text{Al}_{12}\text{Si}_{12}\text{O}_{48}]_8$ である。AlとSiの価電子数の違いを補うようにNaがイオンとして存在しており、これにより結晶構造内の相互バランスが保たれている。NaA型ゼオライトの場合、cageとcageの境にある6員環内に存在する $\text{Na}^+$ は溶液中に容易に移動しやすいことが知られている<sup>3)</sup>。

NaA型ゼオライトが高水分系水溶液に暴露されると、結晶中の $\text{Na}^+$ が水溶液側へ溶出される。逆に高水分系水溶液に含まれる $10^{-7}$  [mol/l]の $\text{H}^+$ がイオン化傾向の差により $\text{Na}^+$ とイオン交換される。その反応は平衡反応でもあるため、高水分系水溶液とNaA型ゼオライトの相互作用が平衡に達するまで $\text{Na}^+$ と $\text{H}^+$ はイオン交換される。 $\text{Na}^+$ と $\text{H}^+$ の原子半径はそれぞれ、 $1.54\text{\AA}$ 、 $0.32\text{\AA}$ であり、NaA型ゼオライト

はイオン交換されることにより、ゼオライト結晶骨格の立体障害が軽減される。また骨格全体の双極子モーメントのバランスも崩れる。これにより  $H^+$  が骨格中に進入する確率が高くなり、かつゼオライト骨格中に含まれる水分子も立体障害低減により骨格外に出る確率が高くなる。そしてこのような変化が起きる確率は水溶液中の  $H^+$  モル量に依存する。Al と O 原子の結合部分に励起された  $H^+$  が攻撃することで Al-O 結合が外れやすくなり結晶構造が損傷を受ける。一度損傷を受けるとさらに立体障害が緩和されたり双極子モーメントバランスが崩れたりしてそれが連鎖反応のようになり、結果 NaA 型ゼオライトの結晶崩壊につながる、と推察する。

このモデルからゼオライトの崩壊を防ぐには、反応の第一条件である  $Na^+$  の溶出を防ぐことになる。即ち水溶液中にその条件での平衡状態となりうる  $Na^+$  のモル量以上の  $Na^+$  モル量をその水溶液が有していれば、 $Na^+$  のイオン交換は進行しないと言える。

図7に2種類のエタノール水比に対する水溶液 500 g 中への NaA 型ゼオライトからのナトリウム溶出量結果を示す。NaA 型ゼオライト粉末の投入量が増加するにつれ水溶液中の  $Na^+$  濃度が上昇した。また、水溶液中の水分濃度の違いにより、 $Na^+$  濃度が異なることも確認できた。このことから、NaA 型ゼオライトから溶出する  $Na^+$  は水量及びその濃度に依存することが容易に確認できる。

4.2 高水分系における前処理充填量と脱水性能との関係

図8は脱水試験装置と前処理容器を組み合わせたラボ試験装置を示している。この装置で前処理容器内の充填量を変化させたときの膜寿命の推移を調査した。試験はワンパス方式で行われ、脱水試験を行う水溶液を NaA 型ゼオライト膜と同様の物質が含まれる粒子を充填させた前処理容器 PF-01 に流通させ前処理を行い、処理した水溶液はそのまま膜モジュールに供給してゼオライト膜によって脱水する。透過液水分濃度が 99.5 wt%-water を下回るまでの累積脱水時間を

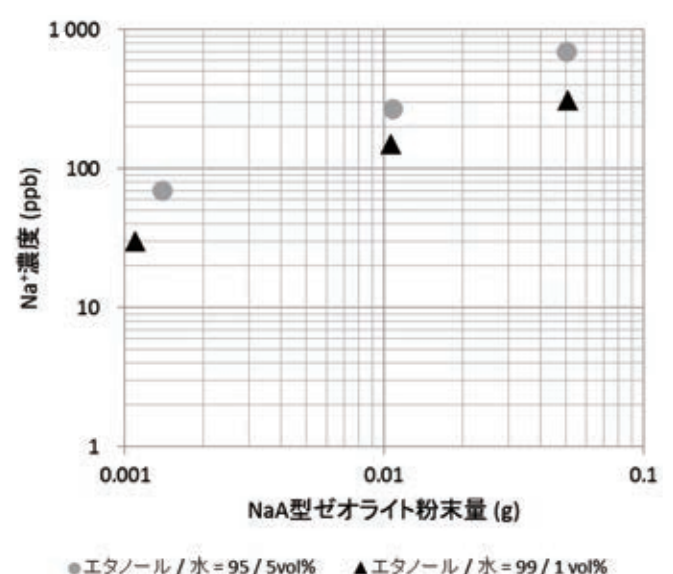


図7 エタノール水溶液中の NaA 型ゼオライト量と  $Na^+$  溶出量の関係

充填粒子の破過時間と設定した。

図9は、各供給水分濃度における充填量を変更した際の破過時間と透過液水分濃度の推移を示している。図5のブランク条件と比較して、図8の前処理容器に流通させた後脱水した条件は透過液濃度の低下が起きるまでの破過時間が大幅に増加していることが確認できた。合わせて、容器中の粒子量と供給側水分濃度を変更することで、その破過時間も変化することが確認できた。水溶液を前処理容器に流通することで、充填剤の NaA 型ゼオライトから  $Na^+$  が溶出される。その流通した水溶液は  $Na^+$  濃度が平衡状態となり、その結果膜から  $Na^+$  が溶出されなかったために膜性能低下が起きなかったと推察できる。このラボ試験結果及び粉末からの  $Na^+$  溶出量の関係から、膜崩壊のメカニズムは  $Na^+$  と密接に関係していることが明確になった。合わせて被脱水水溶液を前処理することで、本来 NaA 型ゼオライト膜が適さなかった高水分系水溶液からの脱水も工業的に見える可能性を見出した。

4.3 酸性不純物含有溶液に対する前処理と膜性能の考察

また 3.2 で述べた実機においては、不純物が原因で膜の崩壊があったと推察している。この案件に前処理設備を導入して改善の効果が現れたことは、今回のラボ試験などから次のように考察できる。前処理設備導入前は、不純物がゼオライト中の  $Na^+$  を溶液中に流出させ、このためゼオライト膜構

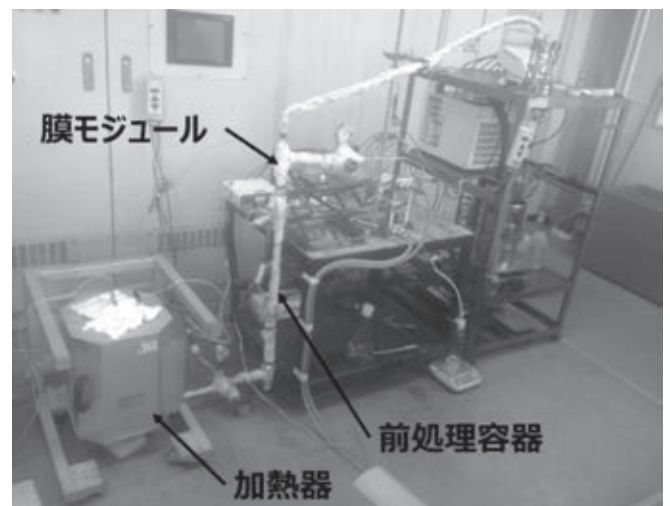
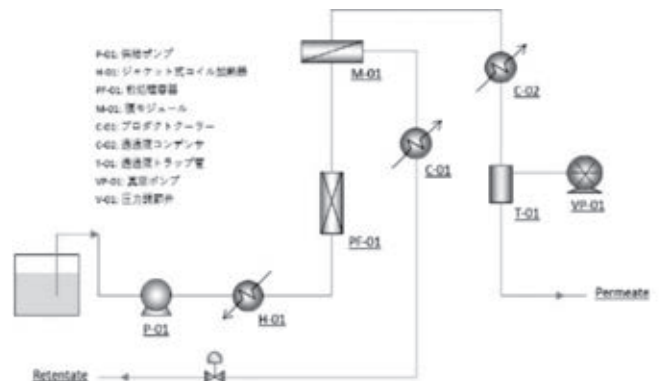


図8 前処理のためのラボ試験装置



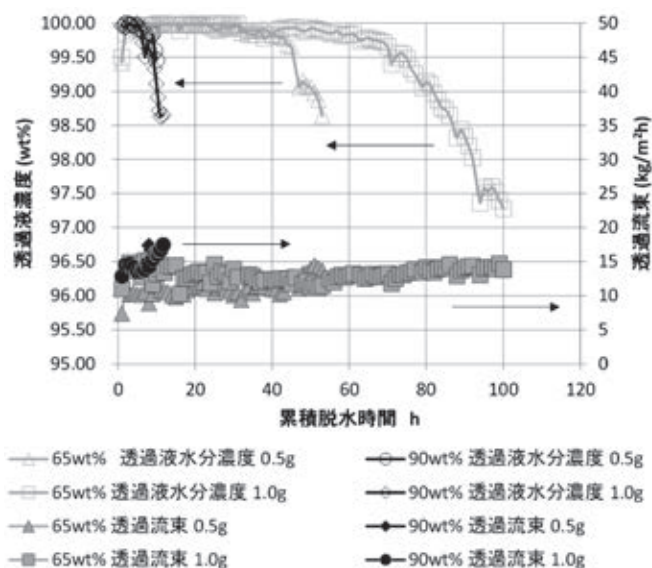


図9 各条件下における前処理充填量と膜性能の関係

造が崩壊したと推測される。これがモジュールの上流プロセス側、つまり前処理設備内で作用することにより溶液中に過剰な  $\text{Na}^+$  が溶出される。水溶液中の  $\text{Na}^+$  は平衡に達しているため膜中の  $\text{Na}^+$  は溶出できない。したがって、不純物が存在していてもゼオライト崩壊の第一条件と考える  $\text{Na}^+$  の溶出が起きないため膜の崩壊を防ぐことができ、膜寿命3ヶ月から1年へ超寿命化ができたと考察する。

## 5. おわりに

これまで述べたように、膜性能低下は水濃度や不純物物質とその量と NaA 型ゼオライトとの総合的な相関関係によって引き起こされる。現象が複雑であるため今回ラボ試験では扱いやすくかつ単純な水濃度のみに着目して課題を細分化し、膜性能低下と前処理条件との相関関係を調査した。その結果ゼオライト膜の材料と同様の材料をゼオライト膜モ

ジュールの前段に設置し脱水処理することで分離性能低下を低減できることがラボ試験により確認することができた。またこの結果により、実際の酸性物質の微含溶剤からの脱水条件における寿命延長効果を裏付ける推察ができた。現在も供給条件(水濃度, 溶剤, 不純物)と前処理条件の相関関係評価を行っている。これらの組み合わせは多種多様であり、特に多成分系における特定不純物に対する NaA 型ゼオライトの外部吸着効果や  $\text{Na}^+$  のイオン交換, 塩化などの解明は更なる追跡調査が必要である。今後はこれらの解明及び定量化された数値を設計に反映することにより、既存/新規プロセスへ適用展開を図っていく。

## 参考文献

- 1) 山崎: 蒸留・膜ハイブリッド化に向けた実装技術開発 9, (6), (2016), p.534, 化学工学会
- 2) H. Habe: Chemical Analysis of Impurities in Diverse Bioethanol Sample, Journal of the Japan Petroleum Institute, 56, (6) 414-422 (2013)
- 3) T. Kyotani: Crystal Structure of Tubular Na-LTA Zeolite Membrane Used for a Vapor Permeation Process Unusual Distribution of Adsorbed Water Molecules, Ind. Eng. Chem. Res. 2009, 48, 10870-10876

共同執筆者:

技術開発本部 技術開発センター

稲葉 利晴

三井造船マシナリー・サービス株式会社

大阪事業所 技術部 小島 肅平

〔問い合わせ先〕

三井造船マシナリー・サービス株式会社

大阪事業所 技術部

TEL 06 - 6681 - 1720 前川 和也

# 福島沖 2 MW 浮体式洋上風力発電実証事業の成果

今北明彦\* 長拓治\* 神永肇\*

## Lessons from 2MW Floating Offshore Wind Turbine, “ Fukushima Mirai ”, in Fukushima Demonstration Project

Akihiko IMAKITA, Takuji CHYO, Hajime KAMINAGA

In Japan, available area for land based wind turbine (WT) is limited. Besides, for construction of offshore wind farm, shallow water area suitable for fixed foundation type WT is also limited in Japan. In Europe, many fixed foundation offshore wind farms installed in the shallow water area are in commercial operation. In order to promote wind power generation in Japan, it is necessary to develop floating offshore wind turbine (FOWT). Ministry of Economy, Trade, and Industry (METI) of Japan started Fukushima floating offshore wind farm demonstration project (Fukushima FORWARD) in FY2012. Mitsui Engineering & Shipbuilding Co., Ltd. (MES) as a member of Fukushima offshore wind consortium built a 2MW FOWT, “ Fukushima Mirai ”. It has produced electricity for three years since December 2013 without major trouble. MES conducted its planning, design, construction, and maintenance. All of them are R&D elements of demonstration project. Fukushima Mirai was the first semi-submersible FOWT in Japan and the second in the world after “ Wind Float ” installed in Portugal. Fukushima FORWARD has built another two FOWTs, one floating substation with transformer and supporting facility on land. This Fukushima FORWARD is the first offshore wind farm in the world. In this report, the overview of Fukushima Mirai, from design to field test, is described and the lessons obtained in the project are also introduced.

日本では様々な理由から陸上風車を設置できる場所は限られている。また、洋上風力発電では着床式に適する浅海域が少なく、浮体式の開発が必要とされる。平成 23 年度から開始された経済産業省委託研究事業「浮体式洋上ウィンドファーム実証研究」では、三井造船は 11 の企業、大学、研究機関からなるコンソーシアムのメンバーの 1 社として参画し、セミサブ(セミサブマージブル)形式を採用した 2 MW 発電施設“ふくしま未来”を建設し、平成 27 年度まで 5 カ年度に渡り、計画、設計、建設から稼働、メンテナンスまでを行った。2013 年 11 月に発電可能状態になり、同 12 月 1 日から発電を開始し、2016 年 12 月まで 3 年間大きな故障もなく発電を継続してきている。セミサブ形式では日本初、世界でも 2 番目の実証試験である。なお、平成 28 年度からは「福島浮体式洋上ウィンドファーム実証研究」として“ふくしま未来”を運転中であり、種々の運転データを集積している。



写真 1 ふくしま未来  
“ Fukushima Mirai ”



写真 2 2016 年 8 月の台風 10 号接近時の状況  
“ Fukushima Mirai ” in the Typhoon “ Lionrock ”, Aug. 2016

\* 船舶・艦艇事業本部 事業開発部

## 1. 緒言

### 1.1 日本における洋上風力発電

日本は山岳地帯が多く、風光明媚な地域には国立公園が存在し、また、平野には居住区域が存在するため、陸上での風車設置可能面積は限られており、洋上風力発電が期待されている。しかし、海底に固定した基礎の上に風車を設置する着床式は水深 50 m が限界とされ、日本周辺海域は欧州のような浅海は限られているので浮体式が必要となる。日本風力発電協会のロードマップ<sup>1)</sup>では 2050 年までに陸上 3 800 万 kW、着床式 1 900 万 kW、浮体式 1 800 万 kW が提言されている。一方、資源エネルギー庁の調査<sup>2)</sup>では、様々な制約条件を仮定し、導入ポテンシャルは陸上 2 500 万 kW、洋上 1 100 万 kW としている。このような背景から、日本では洋上風力発電のポテンシャルは十分にあると見込まれるため、発電能力の大型化に向いている着床式、浮体式の実証試験が行われている<sup>3)~5)</sup>。

### 1.2 浮体形式

風車の支持構造である浮体について様々な形式が提案されている<sup>6)</sup>。表 1 に代表的浮体形式 3 種について定性的な比較結果を示す。TLP は緊張係留型浮体 (Tension Leg Platform)、SPAR は円筒型浮体、セミサブは半潜水式浮体 (Semi-Submersible Platform) の略称である。これらの設置概念を図 1 に示す。浮体の係留方式は 2 種類に分類される。カテナリ係留とは、複数の係留索を水平展開したときに、自重により懸垂線形状にたわんだラインの張力により係留する方式である。緊張係留とは、海底から鉛直方向に配置する緊張係留ラインにより浮体施設を下方に引き込むことによって係留する方式である。

SPAR とセミサブに用いられるカテナリ係留方式では、係留索を水平に展開するため、占有面積が広くなり、係留索の先端部に設置するアンカーに加わる荷重は水平方向となる。三井造船は過去に TLP 形式の洋上風力発電について机上検討を行った。<sup>7)</sup> TLP の動揺は小さいが、アンカーに対する荷重が垂直方向となるので、浮体の浮力に対抗する重量のアンカー又は杭が必要になり、コストが高くなる。SPAR の構造は単純であるが、直立した円筒形状のために喫水が大きくなり、風車搭載時の水深が深くなければならず、工事場所、工事方法に注意が必要である。セミサブは前出 2 形式に比べて浮体重量が重くなる傾向がある。これらの中で長期間にわた

る実証試験まで進んでいるのはスパーとセミサブの 2 種類である。なお、TLP についても欧州で実証試験が開始される予定である<sup>6)</sup>。

これら 3 種類の中から、今回の実証研究において当社は、建造期間、設置場所等の条件を考慮してセミサブ型を選定した。

### 1.3 実証研究事業

平成 24 年 (2012 年) 3 月に開始された経済産業省からの委託事業「福島浮体式洋上ウインドファーム実証研究事業」<sup>5)</sup>では、世界初の浮体式洋上ウインドファームを福島県沖に建設した。この洋上ウインドファームには、「ふくしま絆」(サブステーション)、「ふくしま未来」(2 MW)、「ふくしま新風」(7 MW) 及び「ふくしま浜風」(5 MW) の 4 基の浮体がある。本報ではそのうち、2 MW 風車を搭載した「ふくしま未来」の実証試験結果概要を述べる。

当社は「ふくしま未来」の計画、設計、浮体建造、風車搭載、係留工事、風車の稼働、メンテナンスまで、1 基の浮体式洋上風力発電施設建設のほぼ全てを担当した。発電施設全体としては、変電所、陸上開閉所、海底送電線、陸上送電線などに係る工事があるが、コンソーシアム参加社がそれぞれ担当した。またサブステーションにおける気象海象観測などは東京大学が担当した。全体は丸紅株式会社がインテグレータとしてとりまとめを行った。日本で最初のセミサブ形式を採用した浮体式洋上ウインドファーム建設であるので、設計はもとより、工事方法なども実証研究に含まれた。

「ふくしま未来」は 2013 年 11 月に発電を開始し、その後順調に稼働して現在に至っている。搭載している風車は日立製作所製ダウンウインド型風車 (HTW2.0-80) で、出力は 2 MW、ロータ直径は 80 m である。

## 2. 設計

浮体の設計は風車メーカーと情報を共有化して実施した。参照した規則は日本海事協会の「浮体式洋上風力発電設備に関するガイドライン」<sup>8)</sup>である。浮体設計で特に配慮した項目を以下に示す。

- a) 安全性
- b) 風車からの制限 (傾斜角度、加速度)
- c) 送電線からの制限 (移動距離)



(a) TLP (b) SPAR (c) セミサブ

図 1 各種洋上風力発電方式の設置概念  
Conceptual Drawing of Three Floater Types

表 1 浮体形式比較

Characteristics of Three Floater Types

	TLP	SPAR	セミサブ
適用水深	50 ~ 200 m	80 ~ 300 m	60 ~ 300 m
係留方式	カテナリ	カテナリ	緊張
占有面積	小	大	大
動揺	小	大	中
設置コスト	大	中	中
アンカー荷重方向	垂直	水平	水平
浮体構造複雑性	中	低	中



- d) 無人施設, 無人運転
- e) 設置工事, 曳航工事
- f) 周辺航行船舶への配慮
- g) アクセス性などの運転保守(O&M)

気象海象条件はGrand Renewable Energy 2014<sup>9)</sup>で記述されている波, 風, 潮海流とした。暴風時は50年再現期間の波, 風, 潮海流を風車浮体において最も厳しい条件となる方向から受けると仮定した。疲労強度検討でも同様の方向として20年間の疲労被害度(疲労損傷度)を算定し安全性を確保した。風車稼働時の数値解析はBLADED<sup>10)</sup>を用いた風車と浮体の連成解析とした。設計時のBLADEDは長波頂波での解析であり, 波方向の分散性は考慮していない。

設計に際し, 水槽試験を実施し, 基本的な浮体挙動と曳航時の安定性などを確認した。水槽試験の実施状況例を写真3に示す。

係留索は6組のチェーンとドラッグ式アンカーで構成される。チェーンの呼び径は132mm, フェアリーダを通してデッキ上のストッパで固定される。50年再現期間の気象海象条件で安全性を確認した。疲労強度は波風潮海流が同一方向から来ると仮定し, 20年間の気象海象発現時間と張力から累積被害度を算出し, 安全率を満足することを確認した。

浮体の要目は表2に示したとおりである。

風車のハブ・ナセルは陸上仕様のものを採用したが, 浮体の傾斜を考慮した結果, 増速機からのオイル漏れを防止する改造が必要となった。タワーの構造強度評価は, 日本海事協会のガイドライン<sup>9)</sup>及び土木学会「風力発電支持構造物設計

指針・同解説」に従って実施した。開口部を含む筒身(風車タワー), フランジ, ボルト等について降伏強度, 座屈強度及び疲労強度について評価を行い, 当該規則を満足していることを確認した。

図2に風車浮体の平面図と側面図を示す。浮体はサイドカラム3本とセンターカラム1本の4本で構成され, センターカラム上に風車を搭載している。風車タワー周辺のデッキには変圧器などを配置した。

### 3. 発電施設建設<sup>11)</sup>

図3に建設フローを示す。浮体部分の建造と風車組立ては当社千葉事業所で行った。風車搭載後, 風車と浮体を一体で小名浜港まで曳航した。曳航作業の安全性などは, 有識者, 所轄官庁, 関係者と航行安全性検討委員会を開き検討した。小名浜港では, 岸壁近傍に浮体を着底させて, 風車調整作業を行った。並行して係留索, アンカーを設置位置の所定場所に展開し, 把駐力試験を行った。把駐力とはドラッグアンカーの水平方向保持力である。次に係留索を浮体に接続し, 海底ケーブルを浮体に引き込み, 受電を開始した後に風車を最終調整し, 稼働を開始した。

写真4は千葉事業所での風車組立て状況で, ブレードをハブに取り付けている状況である。浮体上への風車組み立て完了後, 東京湾から銚子沖を経て小名浜港まで曳航した。曳航



写真3 水槽試験実施状況  
Tank Test at Akishima Laboratory

表2 浮体要目

Principal Particulars of " Fukushima Mirai "

浮体形式	半潜水型の洋上風力発電船
長さ	57.50 m
幅	64.23 m
型深さ	32.00 m
計画喫水	16.00 m
船級	日本海事協会
設計水深	120 m

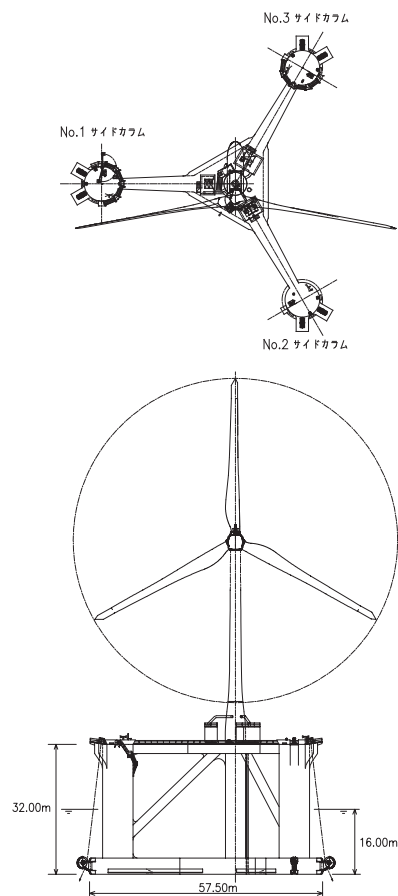


図2 「ふくしま未来」の外形  
Schematic View of " Fukushima Mirai "

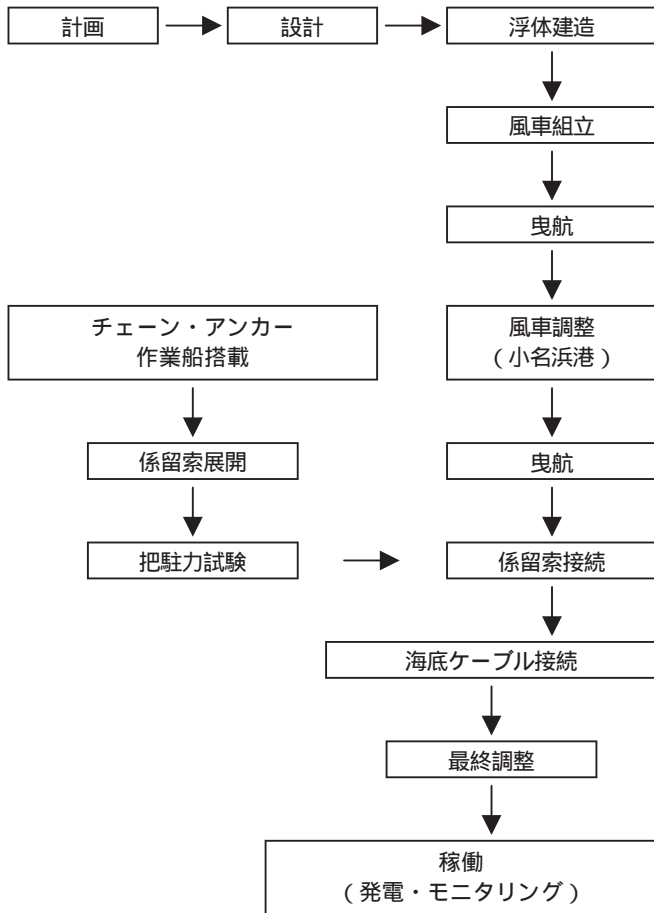


図3 建設フロー  
Work Flow



写真4 風車組立て状況  
Assembling of Wind Turbine on the Floater



写真5 曳航状況  
Towing toward Onahama Bay

時の状況を写真5に示す。曳航中は過度な傾斜を風車に与えないように傾斜計を浮体に搭載し、モニタリングを行った。

小名浜岸壁では作業期間中に暴風状態になることを想定し、浮体を着底させ、風車の調整を行った。なお、あらかじめ着底場所をマウンド状に造成している。

海象条件が厳しい設置海域では、風車浮体の安全性を確保するため、アンカーは十分な把駐力を持つことが必要である。ガイドライン<sup>9)</sup>の把駐力試験では設計最大力のアンカー引張試験が要求されており、実証試験サイトにて試験を行った。

この把駐力試験は台船上に配置した油圧式牽引装置(プラーユニット)に対となる係留索の1本を結合し、他の1本を台船に固定し実施した。本試験は、日本海事協会の立会のもと実施したが、日本の洋上では過去例がない大規模なものであった。把駐力試験の状況を写真6に示す。

把駐力試験終了後のチェーンと浮体の接続はクレーン船を用いて行った。メッセンジャーロープを小名浜にて浮体係留装置に通し、洋上にて、メッセンジャーとチェーンを接続した。その後、クレーンにて、チェーンを引き込み、所定位置でチェーンを浮体上の係留装置に固定した。

次に海底ケーブルを引き込み風車に接続した。受電後に風車の最終調整を行い、発電を開始した。

#### 4. 稼働状況

2014年3月から2016年3月までに経験した最大波高、最高風速などは以下である。

最高風速：44 m/s

最高有義波高：7.2 m

最大傾斜角度：6.5度(ナセル上、風車停止時)

最高風速はナセル風速計によるものであり、有義波高は福島沖ナウファスデータ<sup>12)</sup>を用いている。2016年8月にはこれらの数値を上回る風速46 m/s(台風9号)、最高有義波高9.6 m/s(台風10号)を経験しているが、その後の点検で異常がないことを確認している。稼働開始から大きなトラブルはなく、現在に至っている。

2015年8月2日16時28分に落雷を検知した。その後、浮体上での点検を実施するまでの間、風車を停止した。詳細なブレードの点検を行った結果、異常はなく、9月30日に発電を再開した。このときの雷検知器の測定値は-3.9 kAであった。写真7は浮体に搭載したカメラで落雷の瞬間を捉えた様子を示す。高速撮影ではないので残像があるが、ブレード先端近傍に落雷していることが分かる。

2016年3月までの点検日数を表3に示す。2013年度の対象期間は4カ月間である。



写真6 把駐力試験  
Mooring Tensioning Test on the Barge



写真8 浮体へのアクセス  
Boat Access to " Fukushima Mirai "



写真7 落雷時の状況  
Lightning on a Blade

表3 点検等日数 ( )内風車関連  
Number of Days for Maintenance of Floater and Window Turbine(WT)

	乗船日数		
	定期点検	修理等	その他
2013年度	7(7)	4(4)	0(0)
2014年度	19(15)	7(6)	3(1)
2015年度	9(8)	2(1)	2(0)

点検等のための浮体へのアクセスは乗船補助装置を備えた双胴型作業船を導入した。写真8にアクセスの様子を示す。

風車の定期点検は半年1回を基本としたが、1年目の半年点検以降は半年ごとの点検の間の3か月に1回の目視点検(3ヶ月、9ヶ月点検)も実施している。

図4に風速と出力の関係を示す。風速は2km離れたサブステーションの計測結果である。データにバラツキがあるが、動揺する浮体に搭載された洋上風力発電でも陸上と同等な発電が得られていることを示唆している。

表4に発電実績を示す<sup>13)</sup>。2016年6月までの月間の最大設備利用率は44%(2014年12月 設備稼働率93.3%)であった。

### 5. 浮体挙動

浮体風車のモニタリングでは遠隔制御監視システム(SCADA)のほかに、タワー歪、加速度(3高度)、浮体位置(GPS)、浮体傾斜(ジャイロ)浮体構造歪などを計測している。

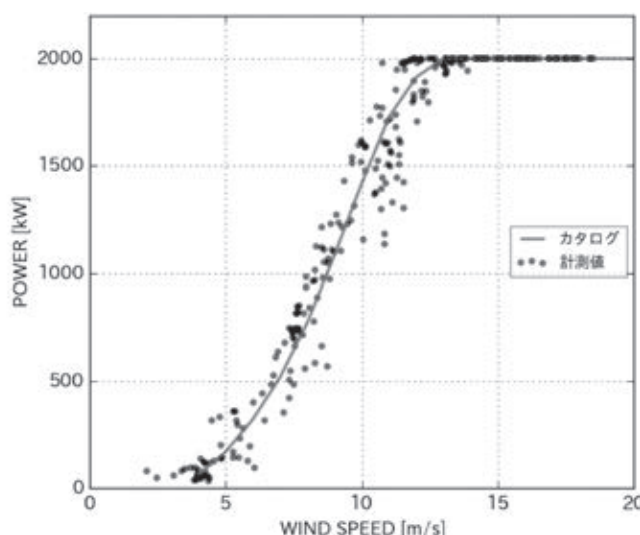


図4 パワーカーブ  
Power Curve of 2 MW WT

設計で用いた数値解析手法の精度を確認するため、検証解析を行った。気象海象条件はサブステーションで観測された数値を用い、これをBLADEDに入力し、結果を計測された浮体の挙動と比較した。

図5に波風潮流の観測データを示す。2015年10月8日台風23号を受けた際のデータである。風車は稼働状態、有義波高6.8m、平均風速21.4m/s、水流0.49m/sである。表5に傾斜角度の比較を示す。数値解析結果と計測結果は同等の値となっており、数値解析手法は妥当であることが分かる。

### 6. 実証試験成果

本実証試験において得られた成果を以下に示す。

- ・セミサブ型浮体を支持構造とした浮体式洋上風力発電が福島沖洋上で可能であることが示された。
- ・本実証試験において使用した風車と浮体では、風速に対する発電性能は陸上とほぼ同等であることが示唆された。
- ・設計手法、建設方法、O&M手法などについて貴重な知見が得られた。



表4 発電実績  
Capacity Factor and Availability Factor

期間	設備利用率	設備稼働率
2013年12月 ～2015年11月	28.70%	89.40%
2015年12月 ～2016年6月	32.20%	95.80%

表5 計測と数値解析の比較(合成傾斜角)  
Comparison of Inclination Angle( degree )

	計測(度)	数値解析(度)
最大	5.23	5.82
最小	0.33	0.57
平均	1.77	2.01
標準偏差	0.76	0.66

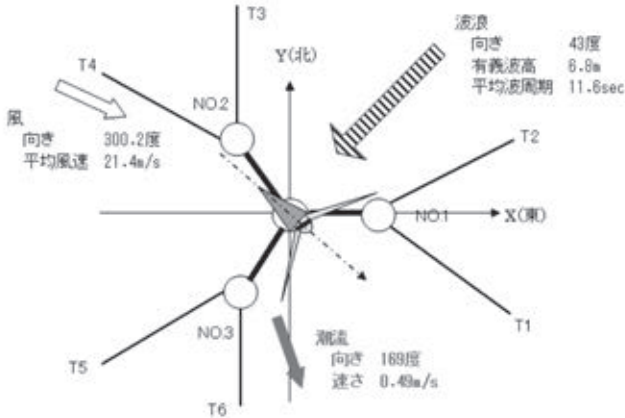


図5 検証用気象海象条件  
Wave, Wind and Current Conditions for Simulation

- ・ 実海域における風車と浮体の挙動データを取得できた。
- ・ 設計で用いた数値解析手法が妥当な解を与えることが確認できた。

## 7. 結言

経済産業省委託研究事業「浮体式洋上ウィンドファーム実証研究」による日本で最初のセミサブ浮体を用いた浮体式洋上風力発電施設“ふくしま未来”は約5カ年度にわたる研究を終え、平成28年度からは、同「福島浮体式洋上ウィンドファーム実証研究」により、福島県沖での事業化を見据えた実証研究に取り組んでいるところである。

実証事業を実施するにあたり、福島洋上風力コンソーシアムのメンバーを始め、関係省庁、自治体、地元の方々には多大なご協力をいただきました。ここに深く謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 一般社団法人 日本風力発電協会：風力発電導入ポテンシャルと中長期導入目標 v4.3, <http://jwpa.jp/pdf/2014-06dounyuuumokuhyou.pdf>, (2017-6-7)
- 2) 伊藤忠テクノソリューションズ株式会社：平成22年度新エネルギー等導入促進基礎調査事業(風力エネルギーの導入可能性に関する調査), [http://www.meti.go.jp/meti\\_lib/report/2011fy/E001771.pdf](http://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2011fy/E001771.pdf), (2017-6-7)
- 3) 国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構，洋上風力発電の取組, <http://www.nedo.go.jp/>

[library/pamphlets/FF\\_201306\\_yojofuryoku.html](http://library/pamphlets/FF_201306_yojofuryoku.html), (2017-6-7)

- 4) 環境省：浮体式洋上風力発電実証事業(GO-TO FOWT) <http://goto-fowt.go.jp/home/>, (2017-5-12)
- 5) 福島洋上風力コンソーシアム：福島浮体式洋上ウィンドファーム実証事業(Fukushima Offshore Wind Consortium), <http://www.fukushima-forward.jp/>, (2017-5-12)
- 6) 公益社団法人 日本船舶海洋工学会：浮体式洋上風力特別検討委員会最終報告書, [https://www.jasnaoe.or.jp/research/dl/report\\_sp1.pdf](https://www.jasnaoe.or.jp/research/dl/report_sp1.pdf), (2017-6-7)
- 7) 鈴木．外：洋上風力発電用 TLP 型浮体の開発，三井造船技報，198(2009-10)，p.19
- 8) 一般社団法人 日本海事協会：浮体式洋上風力発電設備に関するガイドライン, [https://www.classnk.or.jp/hp/pdf/authentication/windmill\\_attestation/ja/gl\\_windmill\\_j201608.pdf](https://www.classnk.or.jp/hp/pdf/authentication/windmill_attestation/ja/gl_windmill_j201608.pdf), (2017-6-7)
- 9) T. Ishihara, et al.,“ METOCEAN DESIGN CONDITION FOR“ FUKUSHIMA FORWARD” PROJECT”, Grand Renewable Energy 2014, July27-August 1
- 10) Bladed User Manual, Ver. 4.2, 2011, GL Garrad Hassan
- 11) ジャパンマリンユナイテッド株式会社．外：福島浮体式洋上風力発電施設建設工事，作業船，315(2014-4)，p.9
- 12) 国土交通省港湾局：全国港湾海洋波浪情報網(NOWPHAS), <http://www.mlit.go.jp/kowan/nowphas/>, (2017-5-12)
- 13) 福島洋上風力コンソーシアム：福島浮体式洋上ウィンドファーム実証研究事業(Fukushima Offshore Wind Consortium) 研究通信, <http://www.fukushima-forward.jp/magazine/index.html>, (2017-5-12)

## [ 問い合わせ先 ]

船舶・艦艇事業本部 事業開発部  
TEL 03 - 3544 - 3345 長 拓治



今北 明彦



長 拓治



神永 肇

# 発電機トルクの制御による風力発電装置の制振と出力平滑化の基礎検討

小川 靖之\*      中田 成幸\*      小野 純二\*\*  
吉田 茂雄\*\*\*      梶原 宏之\*\*\*\*      朱 洪忠\*\*\*

## Fundamental Study on Wind-Turbine Control Methods to Achieve both of Power Smoothing and Drive Train Damping

Yasuyuki OGAWA, Shigeyuki NAKADA, Junji ONO, Shigeo YOSHIDA, Hiroyuki KAJIWARA, Hongzhong ZHU

For practical operation of large-scale wind turbine, multi-objective control during electrical power generation is essential. The objectives to be considered here are (1) Regulation of wind energy extraction, (2) Smoothing of generator output and (3) Damping of drive-train vibration. As these objectives may be in trade-off relation, it is difficult to achieve all objectives simultaneously. We performed a fundamental study on multi-objective control to find a point of compromise or balance of these objectives of which results are shown in this paper. The control method discussed here is a kind of generator-torque control which is based on an idea that dividing a frequency domain into two parts and allocating two objectives on them, i.e. the low frequency domain is devoted for smoothing a generator output, while the high frequency domain is used to damp the drive-train vibration. Proposed filter consists of Band-pass filter (BPF) and High-pass filter (HPF). The filter is relatively simple and may be useful from a viewpoint of implementation. Effectiveness of proposed filter was examined by non-linear wind-turbine simulator, and it showed a good result.

大型風車における実際的な課題の一つとして、発電出力の安定化(風エネルギーの制限、発電機出力の平滑化)と機器の疲労低減(ドライブトレインの安定化・制振)を同時に満たすような制御が望まれている。これらの制御は、操作量を介して互いに影響し合うため、同時に達成することが難しい問題である。本研究開発では、これらの課題に対する基礎的検討を行い、制御手法の一案を示した。一般に、鋼製部品の疲労は、繰返し荷重による累積的な現象として扱われることから、疲労低減のためには、高周波振動を取り除くことが有効と考えられる。一方、発電出力の安定化については、変動の大きさに対してより関心があると思われる。そこで、発電機回転数から発電機トルクへのフィードバック制御において、制御目的を周波数領域で分け、低周波域は出力の平滑化、高周波域はドライブトレインの安定化・制振を主眼においた制御手法を検討した。この制御に用いる新たなフィルタ(DTD)は、バンドパスフィルタとハイパスフィルタを組み合わせた簡単な形であり、実装面からも優れると考える。本制御手法による効果は、非線形風車シミュレーションによって確認し、発電出力の安定化と機器の制振を同時に改善する結果を得た。

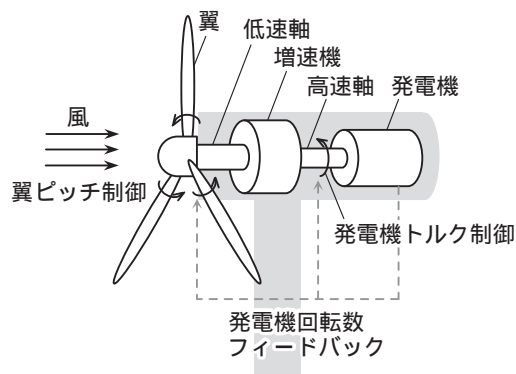


図1 風力発電機の制御の概要  
Basis of Wind Turbine Control

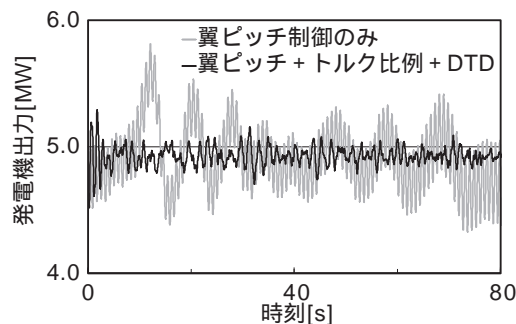


図2 非線形シミュレーションによる新制御手法の効果  
Calculation Result of New Filter  
by Non-Linear Wind-Turbine Simulation Code BLADED  
(Generator Output)

\* 技術開発本部 技術開発センター

\*\*\* 九州大学 応用力学研究所

\*\* エンジニアリング事業本部 第二設計部

\*\*\*\* 九州大学大学院 工学研究院海洋システム工学部門

## 1. はじめに

世界の電源構成における再生可能エネルギーの割合は年々増加しており、2040年には37%に達するとの予測も出されている<sup>1)</sup>。風力発電は有力な選択肢の1つであり、世界的に導入量の多い発電システムである。三井造船は、2004年に1.5 MW 風車1基を当社千葉事業所内に設置して以降、国内の発電所建設などの分野で風力関連事業の実績を伸ばしており、2016年現在、風車の建設実績として68基、発電総容量として115,930 kWに上っている。

当社の風力発電事業は、設計・調達・建設いわゆるEPC (Engineering, Procurement and Construction)を主体とするが、風車の評価技術を向上させることも重要である。風車の技術的側面に目を向けると、発電効率・信頼性などに着目した研究開発が現在も盛んに行われている。本研究開発の対象でもある風車の制御は、ソフトウェアの面から風車性能に関与するものであるが、風車を構成する技術の中で重要な位置を占めている。

一般に運転中の風車は、翼ピッチと発電機のトルクにより制御されている。風力発電機の制御の概要を図1に示す。ピッチ角とは翼根位置における翼の角度のことであり、翼ピッチ制御を行うことにより、風から得られるブレードの揚力を調整し、ロータの回転数を制御することができる。一方、発電機トルク制御は、発電量の最大化・安定化などの目的のために、発電機のトルクを最適値に制御するものである。大型風車の定格風速以上の運転領域においては、要件として風エネルギーの制限、目的として発電機出力の平滑化、ドライブトレインの安定化・制振(発電機回転数の変動の抑制)の三つを同時に満たす制御が求められている。ここで、 $\omega$ は、安定した発電出力を得るための要求であり、 $\omega_{max}$ は、増速機を始めとする機器の疲労荷重を軽減して、機器の長寿命化やメンテナンスコスト低減を図るためのものである。しかし、これらの三つの項目に対する制御は操作量を介して影響し合うため、従来は同時に達成することが難しかった。

そこで当社は、定格風速以上の領域において、これらを同時に扱うための基礎的な検討を行った。ここで用いた考え方

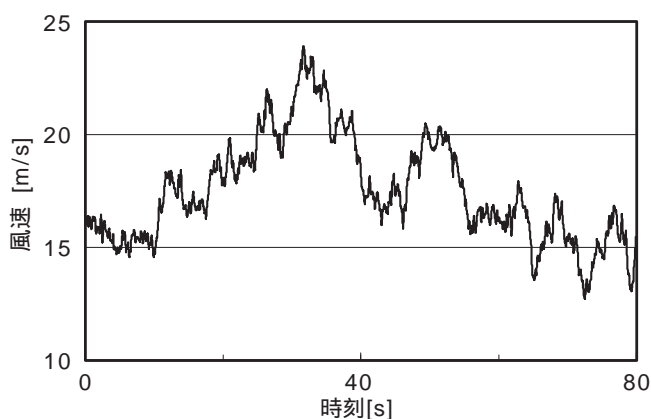


図3 風車シミュレーションに用いる風速の時刻変化  
Wind Speed Profile for Simulation

は、発電機トルク制御を、制御目的に応じて周波数領域に分けて行うものであり、翼ピッチ制御は従来どおりとした。低周波域は に対応した出力の平滑化、高周波域は に対応したドライブトレインの安定化・制振を主眼におくことで、両目的を同時に満たすようにした。これを達成するために、ハイパスフィルタ(HPF)とバンドパスフィルタ(BPF)を組み合わせたフィルタを考案した<sup>2)</sup>。

このフィルタを風車シミュレーションソフト BLADED<sup>3)</sup>に実装し、制御効果を確認したところ、従来の制御に対し優れた特性を示すことが認められたので結果を報告する。本報では、まず従来の制御手法の概要とそれを組み合わせた場合の課題を示し、新しいフィルタによる制御手法を検討する。次に、このフィルタを用いた設計例と、シミュレーションによる効果を示す。

## 2. 個別の目的に対する従来の制御手法

風速場を一定に保つことが可能な風洞試験設備と異なり、自然環境下では風向・風速が絶え間なく変化している。図3にBLADEDの評価に用いられる風速の時刻歴を示す。このような変動風速下で出力を一定に保ち、かつ回転数とトルクを定格点に一致させるためには、風から得るエネルギーを制御する必要がある。このために、翼ピッチ制御、トルク比例制御などが用いられている。代表的な制御回路を図4に示す。翼ピッチ制御にはPI制御が用いられることが多い。図中の $K_{PP}$ は比例ゲイン、 $K_{IP}$ は積分ゲイン、 $1/s$ は積分要素を表す。トルク比例制御部の $K_{PQ}$ は比例ゲインを表す。

翼ピッチ制御には機構の応答速度に限界があり、一般にロータの回転数比例成分のような高周波の出力変動を取り除くことは困難である。この改善策として、トルク比例制御が行われる。これは、発電機回転数の変動に対し発電機トルクを逆符号側に操作して、出力(トルク × 回転数)の平滑化を図るものである。

また、系の特定の振動を抑制する目的で、トルク付加制御

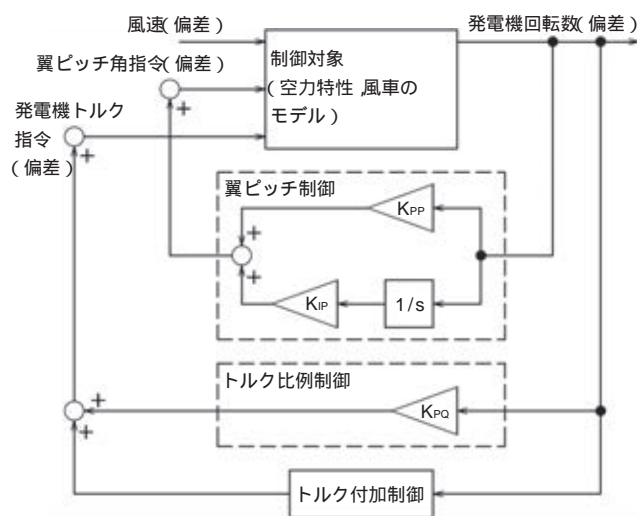


図4 制御系のブロック図  
Control Block Diagram



部にBPFを追加することが一般的に行われている<sup>4)</sup>。これはトルク比例制御が系の安定性を低下させるため、BPFを併用し改善を図ろうとするものである。

しかし、二つの制御を個別に設計し組み合わせた場合、全体として期待する性能を発揮するかどうか不明確と思われる。特に、発電機トルクの制御に関しては、先に示した<sup>3)</sup>がトレードオフの関係になっており、BPFを追加することで、トルク比例制御による出力平滑化性能が低下することが懸念される。当社はこれらの問題を解決するフィルタを検討した。

3. 複数の目的を同時に考慮した制御手法

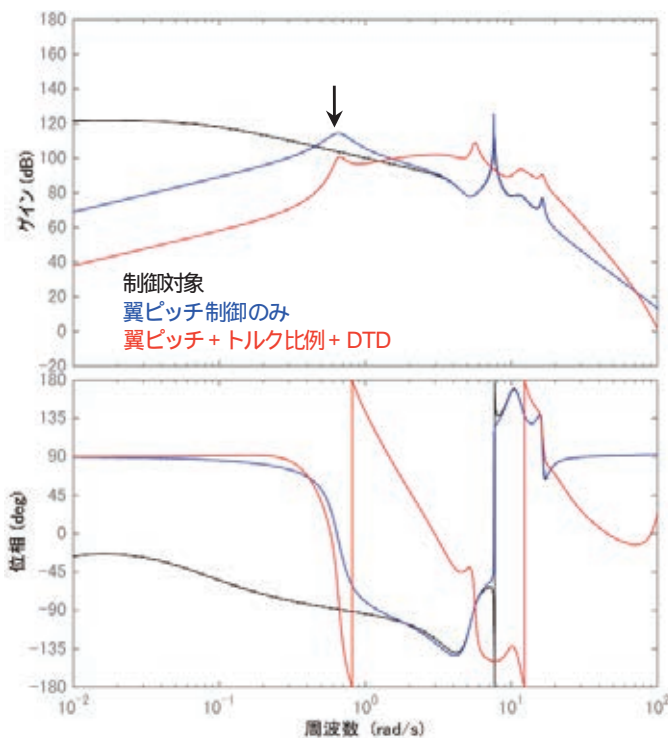
ここでは、5 MWクラスの風車<sup>2)</sup>を例に取り、提案する制御手法を説明する。対象風車の諸元を表1に示す。図5は、この風車の風速16 m/sにおける特性を示したもので、(a)は風速偏差から発電機出力偏差まで、(b)は風速偏差から発電機回転数偏差までの特性である。図中、黒の実線は、図4の制御対象のみの場合であり、青の実線は制御対象に翼ピッチ制御( $K_{pp}=0.015\text{ s}$ ,  $K_{ip}=0.015$ )を加えた場合である。図5(a)より、翼ピッチ制御を加えると低周波域の出力変動が低減されるが、約0.65 rad/sの位置(図5(a)の矢印)、と更に高周波側にピークが現れている。これは、翼ピッチ制御の速度の限界によるものと考えられる。ここにトルク比例制御( $K_{pQ}=2183\text{ Nms/rad}$ )を追加すると、これら高周波の出力変動も抑えられ、系は一時的には高い出力平滑化性能を示す場合もあるが、系の安定性が低下し、この状態で運転を続

けると、約7.5 rad/s(図5(b)の矢印)における風速変動に対しては安定性が低下する結果となる。

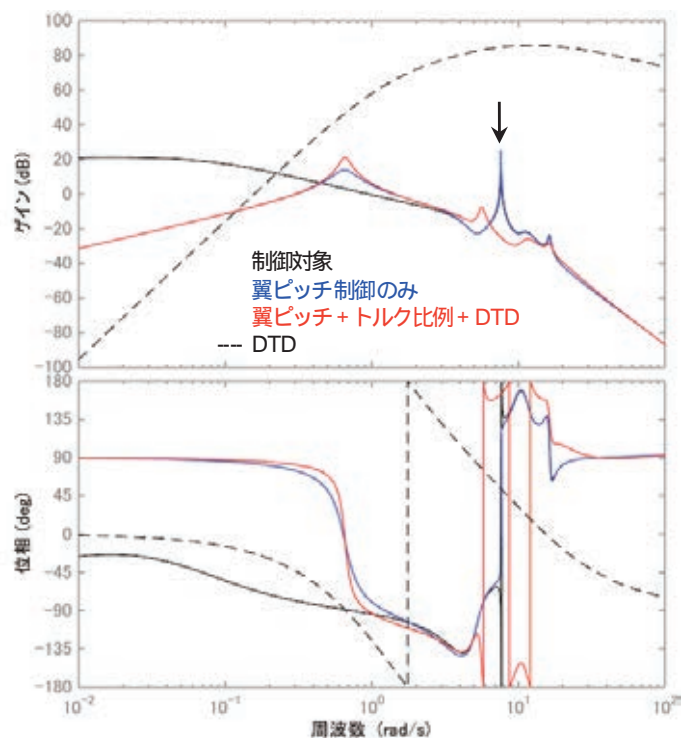
この問題を解決するために、この7.5 rad/sの振動を抑えることでドライブトレインの安定化・制振(1.の目的)が達成されるものとして、トルク付加制御部の設計を試みることにした。その際、極力、出力平滑化性能を低下させないようにするため、HPFとBPFを組み合わせた以下の式で表されるフィルタ(Drive Train Damper : DTD)をトルク付加

表1 風車諸元  
Specification of Wind Turbine

ロータ直径[m]	118
翼枚数	3
ハブ高さ[m]	80
タワー高さ[m]	78
チルト角[°]	4
コーン角[°]	0
ブレードセット角[°]	3
ロータオーバーハング[m]	6
ロータ位置	アップウィンド
トランスミッション	ギアボックス
空力コントロール	ピッチ
固定/可変速	可変速
スピナー直径[m]	6
カットイン風速[m/s]	3.5
カットアウト風速[m/s]	25



(a) 風速偏差から発電機出力偏差までの特性



(b) 風速偏差から発電機回転数偏差までの特性

図5 制御系の特性(線形モデル)  
Frequency Characteristic of Prant(Linear Model)

制御部に用いることで検討を進めた。

$$DTD = \left( \frac{s}{s+1} \right)^n \times G \frac{2}{s^2+2} \frac{s(1+s)}{s+1} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $n$ 、 $1$ 、 $G$ 、及び  $1$  はフィルタのパラメータである。従来のBPFのみのフィルタでなく、HPFが追加されたDTDを用いる理由は、HPFの遮断周波数以下で、トルク付加制御部のゲインを急激に低下させることを狙ったものである。すなわち、遮断周波数以下の領域では、トルク比例制御部からのフィードバック信号が主に伝わることになり、高い出力平滑化性能が期待できる一方、高周波側では、トルク付加制御部のBPFの効果を利用して、問題の7.5 rad/sの振動を抑えることを狙ったものである。

式(1)中の  $1$  は、トレードオフの関係にある発電機出力の平滑化とドライブトレインの安定化・制振を調整するためのパラメータと見なせる。具体的な値は問題ごとに設定する必要がある。BPFの係数の決め方としては、例えば、DTD追加後に固有値解析を行い、系の固有値の最小減衰比に着目して最適係数を探索することが考えられる。

なお、ここではドライブトレインの安定化・制振(1.の )から要求される制御を、特定の周波数の振動の抑制とした。

を達成するために要求される具体的な制御がこのように単純な場合には、従来のBPFのみの制御でも十分な機能を果たす可能性があり、ここで示した方法(周波数領域での目的的分離)の優位性は明確でない。しかし、 $1$  は、実際には累積疲労損傷度と関連付けられた複雑な形の要求になる可能性があり、そのような場合には、提案する方法が有効に働くことが期待される。

#### 4. 設計例と効果の確認

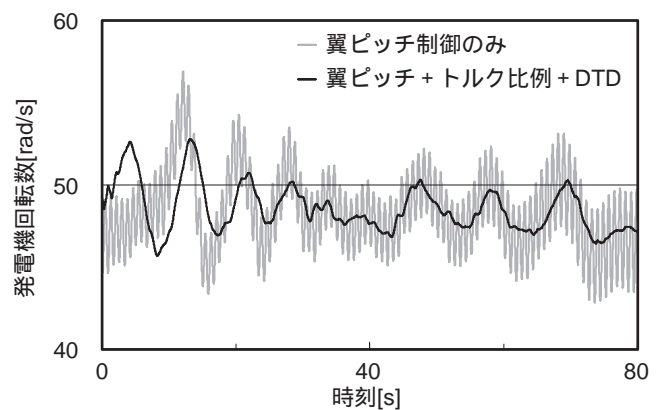
まず、制御設計用の制御対象の設定方法について述べる。1.の要件及び目的 ~ に関する制御を同時に検討する場合、制御設計用のモデル(図4中の制御対象)は、風速から発電機出力までの全体の特性を含んでいる必要がある。また、発電機回転数の変動に影響する翼、回転軸などの弾性変形を表現できるものでなければならない。ここでは、風車全体の物理モデルをBLADED上で作成した後、着目する動作点(風速)周りでそのモデルを線形化し、状態方程式の形で出力した。このBLADEDは、風車に特化した動特性シミュレーシ

ンソフトであり、風、波などの時刻歴を入力することで、風車各部の挙動や発電量などを計算結果として出力することができる。また、制御系設計のための機能を有しており、着目風速位置での風車の線形化モデルを出力することができる。

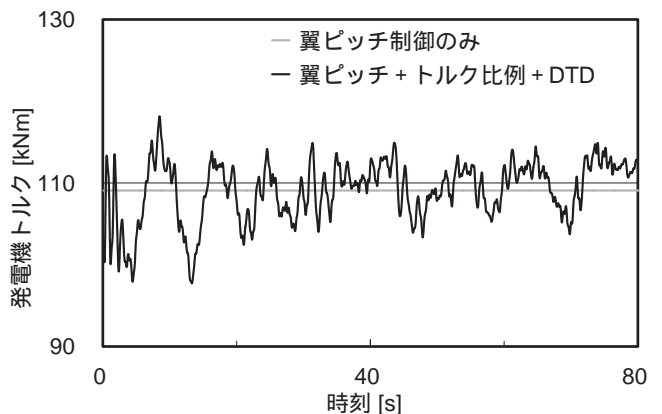
線形化モデルは28次で、ギアボックスマウント、低速軸、翼の弾性変形が表現できるものになっている。表2に線形化されたモデルの状態量を示す。表中の次数25~27は、アクチュエータの遅れに関するものである。検討した動作点の風速は16 m/sで、このときの線形化モデルの特性は、図5中に黒の実線で示したものである。このときの物理モデルの諸元は表1と同じである。

次に、この線形化モデルに対し、3.に示した方針で制御設計を行い、式(1)中の係数を  $n=3$ 、 $1=1.26$  rad/s、 $=12.0$  rad/s、 $G=20000$  Nms/rad、 $=1$ 、 $=0$  s/radと決めた。ここでは、係数の探索は行わず、大まかに試行を行って値を決めている。作成したDTDの特性を図5(b)中に黒の破線で示す。DTDは、低周波域でゲインが大きく低下していることがわかる。

最後に、このDTDを系に追加した結果について述べる。DTDを追加すると、系の特性は図5の赤の実線で示した特性になる。図5(b)より、DTDを追加することで、



(a) 発電機回転数



(b) 発電機トルク

図6 非線形シミュレーションによる発電機の回転数とトルク (BLADED)

Calculation Result of Non-Linear Wind-Turbine Simulation Code Bladed

表2 線形化モデルの状態量  
State Values of Linearized Model

次数	状態量
1, 2	ギアボックスマウント角度変位, 角速度
3, 4	低速軸(ギアボックス側)角度変位, 角速度
5, 6	低速軸角度変位, 角速度
7 ~ 12	翼1のモード(1~3)変位, 速度
13 ~ 18	翼2のモード(1~3)変位, 速度
19 ~ 24	翼3のモード(1~3)変位, 速度
25 ~ 27	翼1~3のアクチュエータポジション
28	発電機トルク

7.5 rad/s 付近の振動(矢印)の改善が期待される。また、低周波域での DTD のゲイン低下の様子から、出力平滑化性能をある程度維持していることが期待される。

検討の図 5 (b)より、翼ピッチ制御のみの場合には、約 0.65 rad/s (周期約 10 s)及び約 7.5 rad/s (周期約 0.8 s)の出力変動が顕著であるが、ここにトルク比例制御と DTD を加えると、トルク比例制御の平滑化性能により、0.65 rad/s の変動が抑えられていることが分かる。一方、高周波の成分については変動が残っている。これは、3. のトルク付加制御部の設計において、高周波域では、出力平滑化性能よりもドライブトレインの制振を優先した結果と考えられる。しかし、翼ピッチ制御のみの場合と比べると、全体的にはかなり改善されていると言える。

これらの効果を確認するために、BLADED による時刻歴応答計算(非線形モデルによる計算)を行った。計算結果を図 2 及び図 6 に示す。これらには比較のため翼ピッチ制御のみの場合も示している。図 6 の(a)(b)は、発電機回転数、発電機トルクの応答である。図 6 (a)を見ると、問題であった 7.5 rad/s の振動が取り除かれ、ドライブトレインの振動が改善されていることが分かる。図 2 からは翼ピッチ制御のみの場合、約 10 秒間隔で 1 割程度の発電機出力の変動があったものが、DTD を用いることにより解消されていることが分かる。さらに、これより短い間隔で風速の揺らぎが原因で生じる出力周期約 0.8 秒の変動幅も小さくなる結果となった。

以上の結果から、ここで提案する DTD を用いることで、1. の ~ の制御要件と目的を同時に満たせることが分かった。

## 5. おわりに

ここでは、大型風車の定格風速以上の領域において、風エネルギーの制限、発電機出力の平滑化、ドライブトレインの安定化・制振を同時に満たす制御手法を検討し、式(1)に示すフィルタを提案した。提案する手法は、発電機回転数から発電機トルクへのフィードバック制御において、制御目的を周波数領域で分けるもので、低周波域は出力の平滑化、高周波域はドライブトレインの安定化・制振を主眼においている。フィルタの形は、ハイパスフィルタ(HPF)とバンドパスフィルタ(BPF)を組み合わせた簡単なものであり、実

装の面からも優れていると思われる。BLADED によるシミュレーションを行い、提案するフィルタが、~ を同時に満たしていることを確認した。

今後の展開としては、対象風速をより低速域まで拡大し、運転モード切り替えを含んだ制御系として検討を行うことが挙げられる。

## 参考文献

- 1) International Energy Agency : World Energy Outlook 2016, (2016) p.411, IEA
- 2) 小川・外 : 出力平滑化とドライブトレイン制振を両立する制御手法の基礎検討, 第 37 回風力エネルギー利用シンポジウム予稿集, (2015-11), p.267
- 3) Garrad Hassan & Partners Ltd. : Bladed User Manual Version 4.3, (2012) DNV-GL
- 4) T, Burton, et al. : Wind Energy Handbook, 2nd Edition, (2011) p.492, Wiley

## [ 問い合わせ先 ]

技術開発本部 技術開発センター  
TEL 0863 - 23 - 3061 中田 成幸



小川 靖之



中田 成幸



小野 純二



吉田 茂雄



梶原 宏之



朱 洪忠



# 追分橋耐震補強工事が完工 - ロッキング橋脚を有する特殊橋梁の大規模地震対策 -

高田 孝史朗\* 青山 智明\*\*

## Seismic Reinforcement of “ Oiwake Bridge ” - Seismic Retrofit Works of the Bridge Supported with Rocking Columns -

Koshiro TAKATA, Tomoaki AOYAMA

A drastic review of the earthquake-resistant design standard was done in Japan after experiencing the Great Hanshin-Awaji Earthquake and the Great East Japan Earthquake.

In line with such reviewed design standard, a lot of seismic reinforcement works are being done to the half-century old Meishin Express Way. Oiwake Bridge which is in between its Otsu Interchange and Kyoto East Interchange is a 3-span continuous steel box girder having rocking piers at the intermediate pier. A detailed investigation of the earthquake-resistant design of this bridge has proved that a large-scale seismic reinforcement is required by renewing the intermediate piers using high damping rubber bearings to make the whole bridge of seismic isolation structure.

Such a large-scale reinforcement was not an easy job. Because, this bridge, however, crosses over National Route 1 and the railway of Keihan Electric Railway Co., Ltd. as well, which makes it impossible to block the traffic on and underneath for a long time due to geographical difficulties.

In order to replace the substructure of the bridge piers in a limited space while maintaining the safe traffic, an unconventional method of replacing the bridge piers is devised and practically adopted. In this paper, seismic performance of the current bridge is investigated and the result of the seismic reinforcement study is reported by means of non-linear dynamic analysis of Oiwake bridge. The actual method of replacing the intermediate bridge piers is also described in detail.

兵庫県南部地震や東日本大震災を経て我が国では耐震設計基準の大幅な見直しが図られ、供用後約50年が経過している名神高速道路でもそれらにのっとった数々の耐震補強工事が行われている。今回報告する追分橋は、中間橋脚にロッキング橋脚を有する鋼3径間連続箱桁橋であり、耐震設計検討を行ったところ、中間橋脚を新設橋脚に取替えかつ橋梁全体を免震構造化する大規模な耐震補強工事が必要となった。しかしながら、本橋の桁下の地理的条件は厳しく、主要幹線道路である国道1号や京阪電鉄の電車軌道をまたぐ高速道路であり、これらを長期的に通止めして耐震補強工事を行うことが困難であった。そこで本工事では橋脚の取替えを工夫し、供用線の安全性を確保しつつ省スペースで下部工を交換する方法として、新たに橋脚取替工法を考案し適用した。本文では、追分橋の非線形動的解析を用いた現橋耐震性能照査や耐震補強検討結果を示すとともに、実際に施工した中間橋脚の取替え工法の詳細について報告する。



写真1 更新前の追分橋  
Oiwake Bridge before Reinforcement



写真2 更新後の追分橋  
Oiwake Bridge after Reinforcement

\* 三井造船鉄構エンジニアリング(株) 技術本部橋梁設計部

\*\* 三井造船鉄構エンジニアリング(株) 建設本部西部工事事務

1. はじめに

追分橋は、我が国初の高速道路である名神高速道路の一部として昭和37年に建設、同38年に供用開始された鋼3径間連続非合成箱桁橋である。架橋位置は滋賀県大津市西部で、国道1号並びに京阪電鉄京津線と立体交差している。

橋梁の概要を図1及び写真1に示す。

供用開始後に行われた主な補強は、交通量の増加や車両の大型化に伴う老朽化対策として、平成7年度に鋼板接着と縦桁増設によるRC床版補強、更には下横構の取替えが実施されている。また、耐震対策として平成8年度に「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様の準用に関する参考資料(案)」<sup>1)</sup>に準拠した耐震検討が行われ、支承機能を補完する装置として両橋台に落橋防止装置が設けられたが、抜本的な耐震対策は行われず、現在に至っている。

本橋は、独立した上下線2橋からなり、両端部支点はRC逆T式橋台により、中間支点は鋼製のロッキング橋脚(橋脚柱の上端及び下端それぞれがピボット支承によるヒンジ構造)により支持されている。

本橋及び本工事の特徴・課題を以下に列記する。

中間橋脚は橋脚単独では自立できないロッキング橋脚で、鉛直荷重のみを支持し、水平荷重は支持できない構造である。

橋軸方向水平荷重はA1橋台のみで支持し、橋軸直角方向水平荷重はA1及びA2橋台で支持する。

斜角はA1橋台で約36度、A2橋台で約26度の極端な斜橋である。

P1橋脚は国道1号とその側道の分離帯に位置し、P2橋脚は京阪電鉄と国道1号に隣接した狭隘な用地内に位置するため、施工ヤードが極端に狭い。

基礎構造及び下部構造の補強工事は名神高速道路直下での施工となるため、上方空間制限を受ける。

名神高速道路、国道1号及び京阪電鉄を供用させながら施工を行う必要がある。

以上の特徴・課題に配慮しつつ、「道路橋示方書・同解説耐震設計編平成24年3月」<sup>2)</sup>(以下、道示と記す)に規定される地震動に対して、所定の耐震性能を確保することが求められた。本工事ではその対策として、ロッキング橋脚を水平力が負担できる新設の鋼コンクリート複合構造橋脚に改築し、既存支承を免震支承に取替え、上部構造の慣性力を各下部構造に分散させるとともに、長周期化とエネルギー吸収

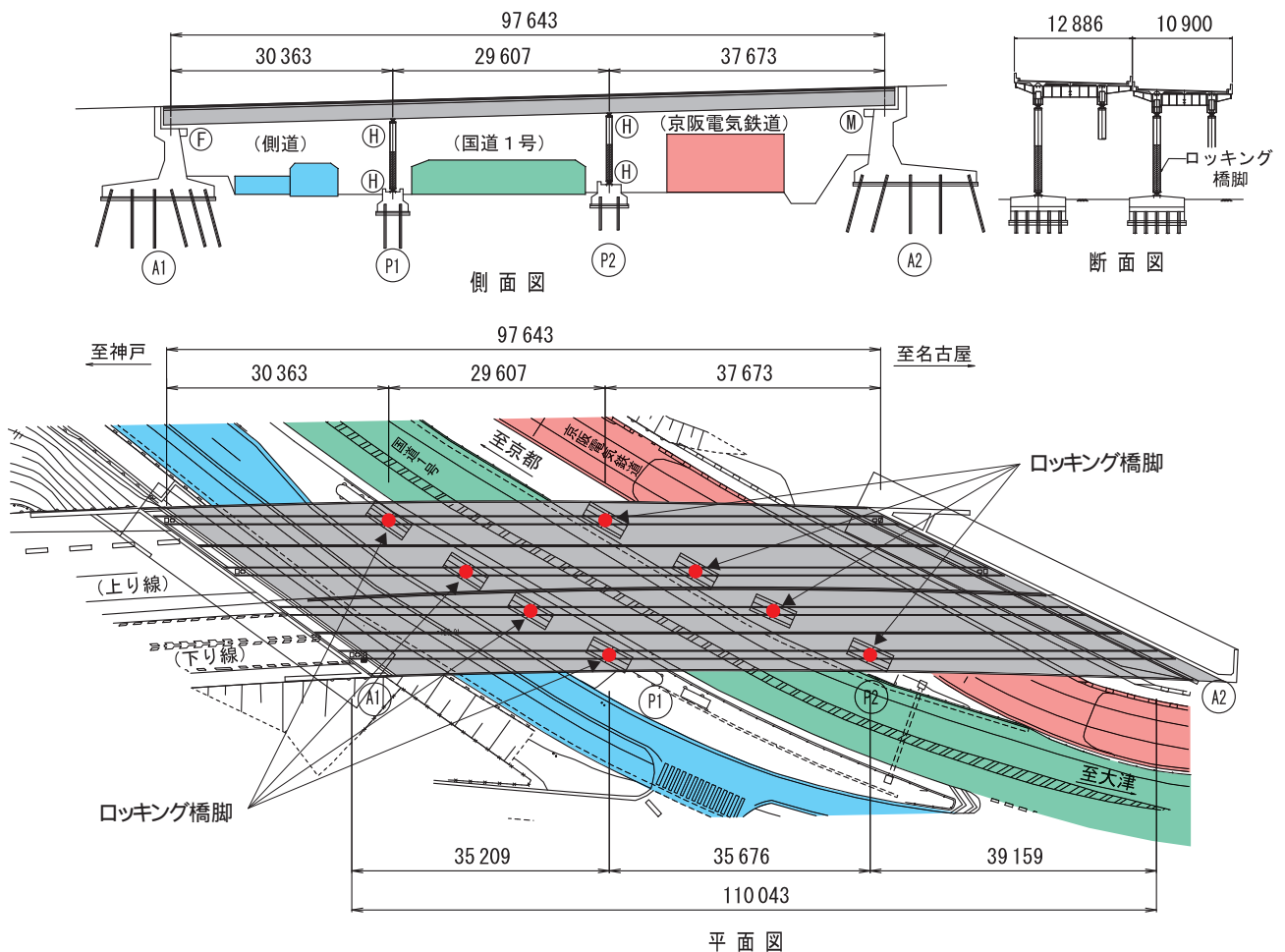


図1 追分橋(上下)対策前一般図  
General Drawing of Oiwake Bridge before Measures

による減衰の向上により、大規模地震に対応できる免震構造に改良した。本工事の概略工程を図2に示す。本報では、現橋(写真1の状態)の耐震性能照査、前述の大規模地震対策の検討・立案、対策後の耐震性能照査及び本工事の主要工種である橋脚取替えの施工について報告する。なお、本工事は、検討当初から大阪市立大学山口隆司教授を委員長とする「大規模地震対策検討委員会」を立ち上げ、随時助言を頂きながら検討を進めた。

## 2. 設計方針

### 2.1 目標とする耐震性能

本橋は関西地区と中部地区を結ぶ名神高速道路を構成する橋梁であり、高速道路及び国道1号は緊急輸送道路ネットワークを構成する最重要道路であることから、大規模地震による被害を最小限に抑えることが求められている。

大規模地震動に対しての本橋の目標とする耐震性能は、道示に準じて、地震による損傷が限定的なものに留まり、橋としての機能の回復が速やかに行い得る性能とした(表1参照)。

### 2.2 構造部材の限界状態と照査法

耐震性能の照査は、表2に示す通り構造部材別に目標とする限界状態を設定し、各構造部材の応答値と比較して照査を行った。

## 3. 現橋の耐震性能照査

### 3.1 解析方針及び解析モデル

#### 3.1.1 解析手法

本橋は、上下線2連の上部構造が並行しており、斜角が非常に小さく、中間橋脚はロッキング橋脚という特殊な構造上の特徴を有している。このため、地震時の橋梁全体の挙動が複雑になることが予想されたので、解析手法は幾何学的非線形と材料的非線形を考慮した複合非線形時刻歴応答解析とし、解析モデルは上下線2連の上部構造及び下部構造(橋台及び中間橋脚)を含めた3次元モデルとした。

解析プログラムには複合非線形FEM解析ソフトウェアであるSeanFEMを用いた<sup>4)</sup>。その概要を表3に示す。

#### 3.1.2 解析モデル

各部材の諸元は、竣工時、その後の補修・補強施工時及び平成8年度の耐震検討時の各設計図面、報告書に基づいて算

定した。各部材のモデル要素一覧を表4に、解析モデルを図3に示す。

### 3.1.3 設計地震動及び死荷重

設計地震動は、道示に示される種地盤に対するレベル2地震動の加速度波形(以下、道示波と記す)を用いた。地震動の入力方向は、橋軸方向と橋軸直角方向の2方向とした。

死荷重は当初の死荷重に加え、過去に実施された補修・補強工事による増加死荷重も考慮して設定した。

### 3.2 プッシュオーバー解析

既設橋の地震時における限界状態と損傷過程を把握するため、プッシュオーバー解析を行った。解析モデルは、前述の動的解析に用いる3次元モデルとした。

橋軸方向についての解析結果で得られたP-曲線図を図4に示す。本解析結果では、端部の支承が早期に損傷し、仮に支承機能を補強したとしても橋台の躯体及び基礎構造が降伏に到ることが予測された。

### 3.3 動的解析結果

現橋の動的解析による照査の結果、上部構造全体に大きな曲げ変形及び捩れ変形が生じ(図5)、主要部材である主桁

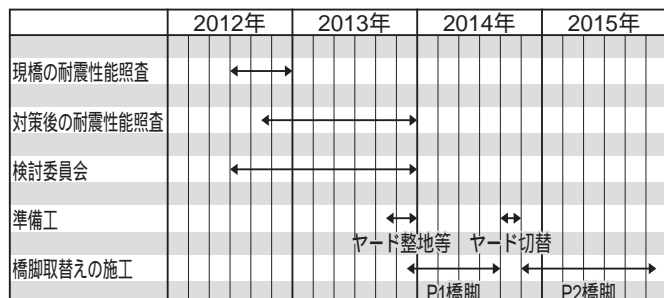


図2 追分橋耐震補強工事 概略工程  
Seismic Retrofit Works Process for Oiwake Bridge

表1 目標とする耐震性能  
Target of Seismic Performance

設計地震動		A種の橋	B種の橋
レベル1地震動		地震によって橋としての健全性を損わない性能(耐震性能1)	
レベル2地震動	タイプ の地震動(プレート境界型の大規模な地震)	地震による損傷が橋として致命的と	地震による損傷が限定的なものに留まり、橋としての機能の回復が速やかに行い得る性能(耐震性能2)
	タイプ の地震動(兵庫県南部地震のような内陸直下型地震)	ならない性能(耐震性能3)	

表2 限界状態と照査法  
Limit State and Check Method

構造部材	目標とする限界状態	照査法
上部構造	鋼部材	弾性域を超えない
	支承	弾性域を超えない
ロッキングピア(鋼部材)	弾性域を超えない	応答ひずみによる照査
橋台	縦壁	弾性域を超えない
	基礎	弾性域を超えない

表3 解析ソフト概要  
Analysis Software Overview

解析ソフト	SeanFEM ver1.2.2
要素	FEM 梁要素(ティモシェンコ梁理論)
材料非線形性	ファイバーモデル, シェルモデル
幾何学非線形の種類	微小ひずみ, 有限変位, 有限回転
幾何学非線形の計算法	updated Lagrange 法
時間積分法	直接積分法(ニューマック 法)
反復計算	Newton-Rapshon 法



表4 モデル要素一覧(現橋照査)  
Model Element List (Check before Measures)

部位		モデル要素
上部構造	主桁	ファイバー要素
	横桁	
	縦桁	
	横構	
	RC床版	非線形シェル要素
支承	線形ばね要素	
下部構造	橋台	線形梁要素
	ロッキングピア	ファイバー要素
基礎	橋台	線形ばね要素(S-Rばね)
	ロッキングピア	固定

表5 P1・P2ピボット支承 変位照査  
Displacement Check of P1・P2 Pivot Bearing

		単位	橋軸方向加振		直角方向加振	
			最大応答値	許容値	最大応答値	許容値
			P1	上り線	G1 mm	35.3
		G2 mm	36.7	53.3	161.6	53.3
	下り線	G1 mm	28.8	44.4	217.7	44.4
		G2 mm	32.3	42.9	269.8	42.9
P2	上り線	G1 mm	44.0	53.3	199.6	53.3
		G2 mm	44.8	52.0	177.3	52.0
	下り線	G1 mm	41.1	41.5	271.4	41.5
		G2 mm	42.3	39.7	190.5	39.7

や横桁が広範囲に渡って塑性化することが分かった。支承には許容値を大きく上回る水平力が発生しており、支承を補強しても橋台に作用する応答値が橋台の耐力を超過して橋台が損傷する結果となった。ロッキング橋脚では、表5に示すように橋軸直角方向地震時の変位が上下端のピボット支承位置での許容変位(許容回転量から設定)を大幅に超過し、橋脚の倒壊が懸念される結果となった。

また、橋軸直角方向地震時では、上り線と下り線の上部構造どうしの衝突が生じる結果となった。

#### 4. 耐震性能向上対策

##### 4.1 耐震性向上の方針

現橋の耐震性能の照査結果から、耐震性能を著しく向上させる必要があり、耐震デバイスの追加や部材の直接補強ではなく、以下に示す抜本的な対策を講じることとした。

上部構造の地震時慣性力を各下部構造に分散させる。

長周期化により地震時加速度の低減を図る。

エネルギー吸収による減衰の向上を図る。

斜角による地震時の挙動を考慮して全方向に減衰を向上させる。

これらの方針を満足する工法として、免震支承への取替え、水平力を分担できる中間橋脚への取替え、上部構造の部分補強を採用した。

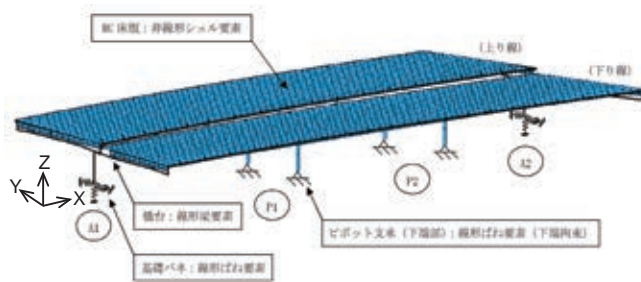


図3 解析モデル概要  
Schema of Analysis Model

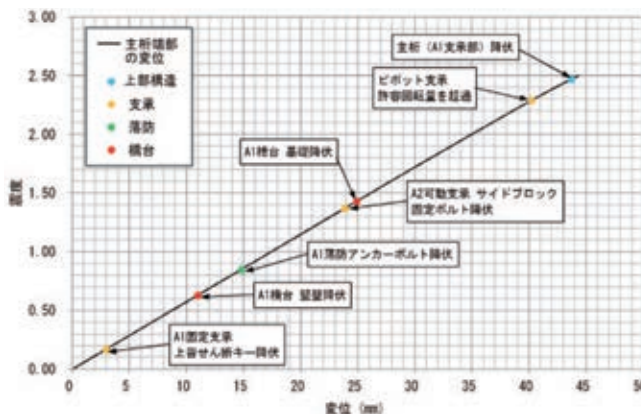
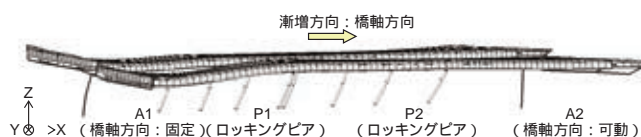


図4 プッシュオーバー解析結果(橋軸方向)  
Pushover Analysis Result (Bridge Axis Direction)



図5 現橋の動的解析変形図  
Deformed Drawing in Dynamic Analysis of Current Bridge

#### 4.2 免震支承

以下の理由により、免震支承は高減衰ゴム支承とし、設置位置は、既設支承と同じく主桁位置に設置し、移動方向は橋軸方向、橋軸直角方向とした。

主桁直下付近の橋台天端は空間が狭いため、機能分離型支承の設置は困難である。

斜角が小さいため、端横桁の支間長が10m程度と長く、既設の床組補強部材が広範囲に設置されているため、端横桁位置には、支承設置が困難である。

鉛プラグ入ゴム支承よりも経済性に優れる。

#### 4.3 中間橋脚

##### 4.3.1 上部構造の支持位置

用地制限により、ベント等の仮受け設備が設置できないため、完成後の新設橋脚に鉛直反力を盛替えるまでは、既設の

ロッキング橋脚で上部構造を支持する必要がある。

支間長の変更による既設上部構造への影響が生じないように、新設の支承位置は変更しない。

#### 4.3.2 基礎構造の形式

当該地での基礎構造形式は、杭基礎及びフーチングが一般的であるが、以下に示す現地条件を満足するため、大口径基礎杭(単杭)を採用した。

上空制限下での施工であるため、杭打ち機等の大型重機、建設機械の使用が困難である。

国道1号及び京阪電鉄に囲まれた狭隘な用地内での施工となる。

供用中の京阪鉄道、国道1号及び既設ロッキング橋脚間での隣接施工となり、施工中の振動を低減する必要がある。

最小限の交通規制とし、速やかな工事完了が望まれる。

#### 4.3.3 橋脚の形式

以下の理由により、円形断面のRC柱と鋼製梁からなる複合構造橋脚を採用した。

免震橋として、エネルギー吸収を免震支承で行えるように下部構造の剛性を確保する。

下部構造の死荷重低減を図る。

各下部構造の斜角が異なり橋梁中心線方向と一致しないため、柱断面は方向性の無い円形が望ましい。

#### 4.4 上部構造の部分補強

免震構造化後の動的解析による照査結果では、上部構造の内、主桁は全て弾性域に収まり、横桁もほぼ弾性域に収まったが、支点付近の横桁は一部で塑性化が見受けられた。

また、現橋照査時に見受けられた橋梁全体の曲げ変形及び、捩れ変形の抑止を目的として、支点近傍の横桁を鋼部材による補強を行った(補強箇所は図6参照)。

側縦桁の一部においても塑性化が見受けられたが、その範囲は限定的であり、また側縦桁の直上には地覆、壁高欄が設置されており、緊急車両の通行に影響は無いと判断し、側縦桁の補強は行わなかった。

表6 モデル要素一覧(対策後照査)  
Model Element List (Check after Measures)

部位		モデル要素	
上部構造	主桁	ファイバー要素	
	横桁(補強部含む)		
	縦桁		
	横構		
	RC床版	非線形シェル要素	
	免震支承	非線形ばね要素	
橋台	縦壁	線形梁要素	
	基礎	線形ばね要素(S-Rばね)	
	鋼製梁	線形梁要素	
中間橋脚	隅角部	線形梁要素(剛部材)	
	RC柱	柱部	非線形梁要素(M-)
		基部	非線形梁要素(M-)
	基礎	線形ばね要素(S-Rばね)	

## 5. 対策後の耐震性能照査

### 5.1 解析方針及び解析モデル

解析手法及び使用プログラムは、現橋の耐震性能照査と同じとし、解析モデルは耐震性能向上対策(免震支承、中間橋脚及び横桁補強)に対応するモデルとして、表6に示すモデル要素一覧とした。

設計地震動は道示波であるレベル2のタイプの各3波及びレベル2のタイプの各3波の計6波とした。

上部構造に支配的な地震波の入力方向は橋軸方向と橋軸直角方向であり、各下部構造に支配的な地震波の入力方向は各下部構造の斜角方向と斜角直角方向であるため、入力方向は、図7に示す橋軸、橋軸直角、各斜角及び各斜角直角方向の合計8方向とした。

### 5.2 動的解析結果

#### 全体系の挙動

免震化によって上部構造全体が地震波入力方向に滑らかに移動しており、対策前に発生していた上部構造全体にわたる曲げ変形が生じていない(図8)。また、地震時の上部構造慣性力の合計が対策前の約21%(9300kN/43800kN)に低減されており、免震支承による長周期化と減衰の効果が著しいことが分かる。

#### 上部構造

主桁及び横桁(横桁補強部も含む)は弾性域に収まっているが、補強をしない一部の側縦桁は部分的に塑性化する。支承

最大応答変位は、許容変位(250%せん断ひずみ)以下

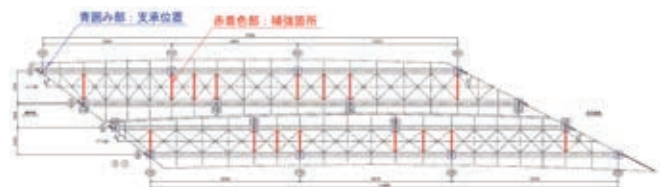


図6 横桁補強位置  
Reinforcement Position of Transverse Girder

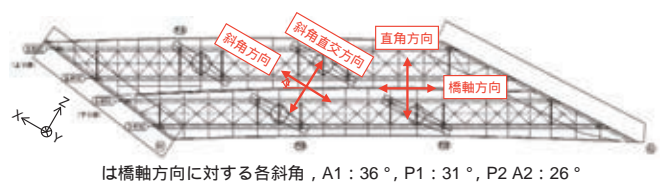


図7 地震波入力方向  
Input Direction of Earthquake

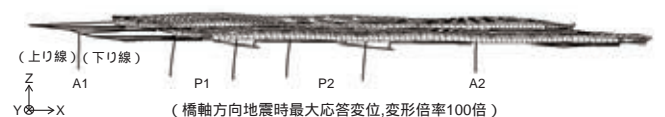


図8 対策後の動的解析変形図  
Deformed Drawing in Dynamic Analysis of Bridge after Measures

に収まっている。

下部構造及び基礎構造

橋台、中間橋脚共に弾性域に留まっており、耐震性能の向上が確認できた。

遊間量

最大応答変位は、桁端部の桁遊間量及び上下線間の遊間量に収まり、衝突の危惧はなくなった。

6. 橋脚取替えの施工

6.1 施工中の上部構造支持方法

本工事では以下の理由により、下部構造施工中の上部構造の支持は、ペント等の仮設構造物を用いず、既設の橋脚での支持状態から完成後の新設橋脚に反力を盛替えた。

施工ヤードが狭隘である。

供用中の高速道路での橋脚取替えであり、国道1号及び京阪電鉄との隣接施工となることから、より安全性の高い工法が求められた。

既設のロッキング橋脚で上部構造を支持した状態で新設橋脚を建設するため、新設橋脚の鋼製梁部材は暫定的にロッキング橋脚の柱が貫通する構造とした。貫通部は、ロッキング橋脚の撤去後に、梁の上フランジ側は支承台座で、下フランジ側はカバープレートにて閉塞した。

6.2 狭隘な桁下空間での橋脚建設

低空間かつ狭隘な施工ヤード内で橋脚の建設を行うため、図9に示す施工ステップを立案して施工を行った。

Step-1：基礎及びRC柱1次施工

深礎杭基礎及びRC柱の最下部を先行して施工した(写真3)。

Step-2-1：貫通ブロック(鋼製梁先端部)架設

既設橋脚柱を挟み込む形に分割した鋼製梁の先端部の小ブロックを小型クレーンを用いて架設した(写真4)。

Step-2-2：鋼製梁部材地組み・横取り・縦取り

鋼製梁先端部以外のブロックは、上空制限のない位置で大型重機を用いて地組立てし、軌条設備による横取り・縦取り工法にて所定位置まで移動した(写真5)。

Step-3：鋼製梁一体化とジャッキアップ

前述のStep-2-1で架設したブロックを油圧ジャッキ及び総ネジのPC鋼棒を用いて吊り上げ(写真6)、梁全体を連結した。その後、梁の下にジャッキを設置し、梁上の吊り上げ、設備解体後に所定の高さまでかさ上げを行った(写真7)。

Step-4：RC柱2次施工と剛結部施工

先行して施工したRC柱基部と鋼製梁間のRC柱を構築した後、鋼製梁とRC柱との剛結部を施工して新設橋脚を完成させた(写真8)。

6.3 既設ロッキング橋脚の撤去

Step-5：反力盛替えとロッキング橋脚撤去

既設橋脚撤去に先立ち、上部構造の反力を新設橋脚上に設置した仮受けジャッキに移行した。

上空制限があるため、既設橋脚の撤去には大型重機が使用できないこと、柱が新設橋脚の梁内部を貫通している状態で上下方向しか自由度がないことを勘案し、既設橋脚を撤去設

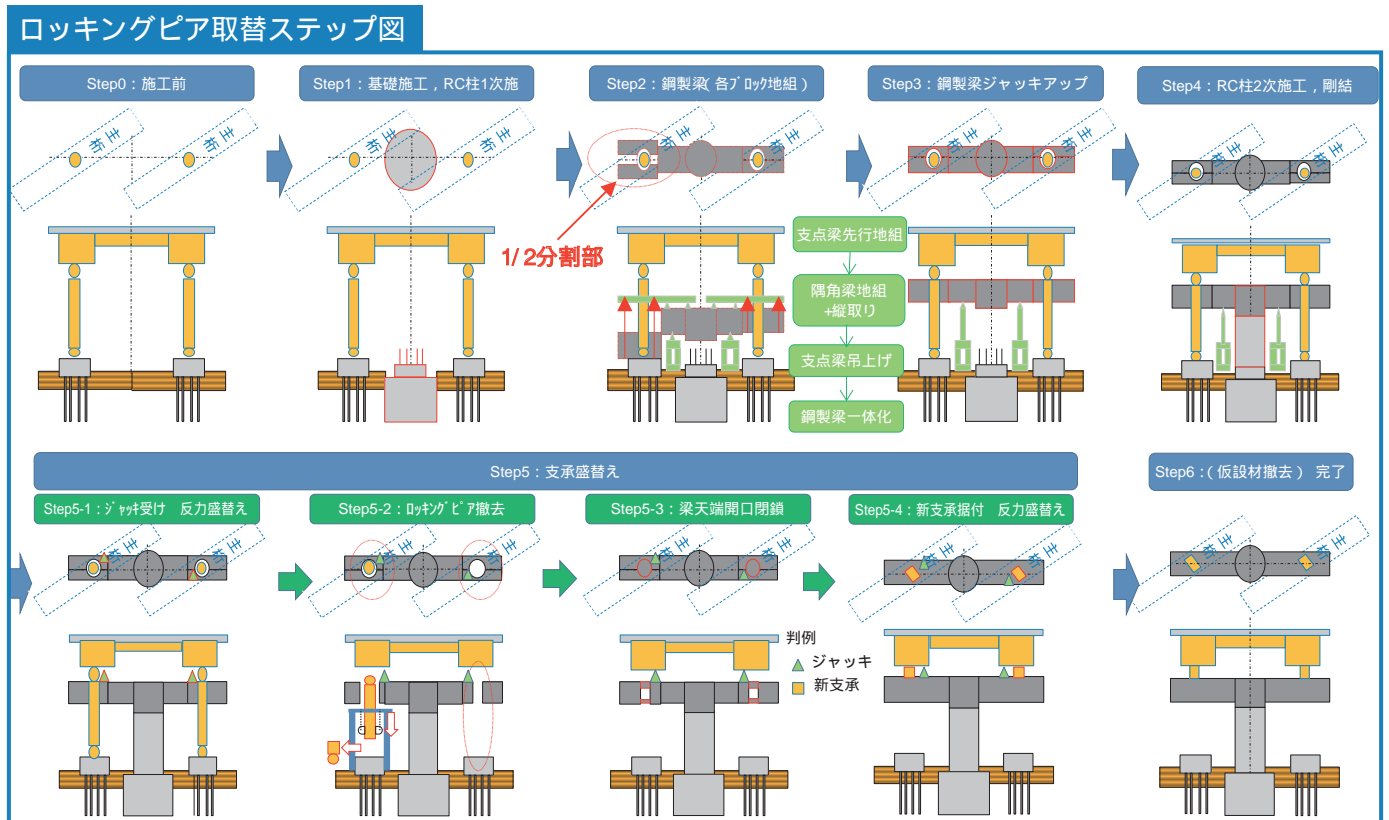


図9 施工ステップ  
Construction Step



備で周囲から支持して下部から順次輪切りブロックに切断して撤去する「ダルマ落とし方式」を考案した(写真9)。

なお、撤去設備は既設橋脚の重量を支持するとともに、撤

去中に柱が不安定とならないような転倒防止機能も兼ね備えている。

既設橋脚内には中詰めコンクリートが充填されていたた



写真3 基礎工及びRC柱1次施工  
Construction of Pier Foundation and Primary Construction of RC Pier



写真4 貫通ブロック(鋼製梁先端部)架設  
Construction of Through Block(Tip of Steel Beam)



写真5 鋼製梁横取り・縦取り  
Longitudinal and Transverse Moving of Steel Beam

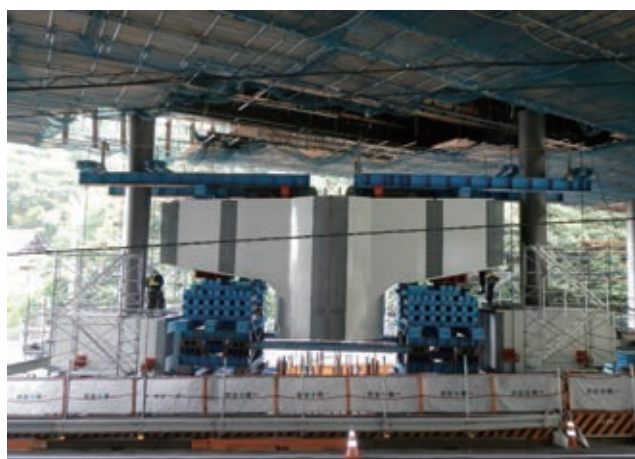


写真6 鋼製梁一体化・吊り上げ  
Integration - Lifting of Steel Beam



写真7 鋼製梁ジャッキアップ  
Jack Up of Steel Beam



写真8 新設橋脚完成  
New Bridge Piers Completed



写真9 既設ロッキング橋脚の撤去  
Removal of Existing Rocking Piers

め、外側の鋼管部分はガス切断で、内部のコンクリート部分は湿式のワイヤソー工法で切断した。

写真2に施工完了後の橋脚を示す。

なお、上記の橋脚更新に関する新工法は、西日本高速道路株式会社と三井造船鉄構エンジニアリング株式会社と共同で特許を取得している(特許第6028984号)。

## 7. おわりに

ロッキング橋脚を有する橋梁は、建設スペースが限られた高速道路の跨道橋などで構造の合理性から多く建設されたが、近年その耐震補強方法が課題となっている。本報が同種橋梁の一例、狭隘な作業スペースでの施工方法の参考となれば幸いである。

最後に、「大規模地震対策検討委員会」の委員の皆様方、西日本高速道路株式会社の関係者を始め、本工事に関連頂いた全ての皆様方に感謝の意を表す。

## 参考文献

- 1) 公益社団法人 日本道路協会：「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様」の準用に関する参考資料(案)(1995.6)
- 2) 公益社団法人 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 耐震設計編(2012.3)
- 3) 六車・外：ロッキング橋脚を有する特殊橋梁の大規模地震対策(追分橋耐震・補強工事) 橋梁と基礎(2017-3), p.14
- 4) 株式会社耐震解析研究所：SeanFEM, <http://sean.co.jp/software.html>, (2017-5-10)

## [ 問い合わせ先 ]

三井造船鉄構エンジニアリング株式会社  
技術本部橋梁設計部  
TEL 06 - 6446 - 3101 高田 孝史朗



高田孝史朗



青山 智明



# 船用ディーゼル機関 架構へのピーニング処理の適用

八木 伸 暁\* 木村 陵 介\* 長崎 俊 憲\*\* 下野 大 地\*\*\*

## Application of Peening to Frame Box of Marine Diesel Engine

*Nobuaki YAGI, Ryosuke KIMURA, Toshinori NAGASAKI, Taichi SHIMONO*

Peening is a way to improve fatigue strength by giving blow to a material surface successively, which makes the surface form of the material smooth and adds compressive residual stress by causing plastic deformation. Fatigue strength is said to increase thereby. Meanwhile, the improvement of fatigue strength depends upon the stress state of the places applied; and unless the work is done properly, the fatigue strength may even reduce.

Mitsui Engineering & Shipbuilding Co., Ltd. has tried the application of the peening by a metallic pin to the welded part of marine diesel engine( DE )frame box. Fatigue testing was carried out using the load carrying type fillet welded T-joints assuming the application on the real equipment.

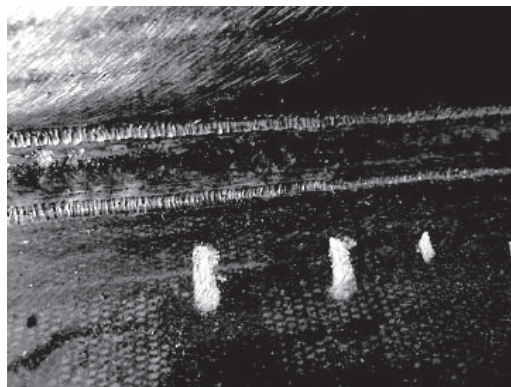
The test result has proved that the peening can secure the equivalent fatigue strength as conventional grinding method. Furthermore, working time for real construction field has been reduced into half by the peening compared with grinder, and dusts and chips were not produced. The working environment of the factory floor was greatly improved by application of the peening.

ピーニング処理は、材料表面を何らかのツールで連続的に打撃する方法であり、これにより表面形状を滑らかにするだけでなく、塑性変形により圧縮残留応力を付加させ、疲労強度を向上させる。一方で、その疲労強度向上効果は適用箇所の応力状態によって異なり、確実に施工を行わなければ低減する。三井造船では、疲労強度向上を目的にグラインダ処理を適用していた船用ディーゼル機関( DE )架構の溶接部を対象に、金属ピンによるピーニング処理の適用を検討した。

適用に際して、まずは実機を想定した荷重伝達型の T 継手試験体を用いた疲労試験を実施し、ピーニング処理が従来と同等の疲労強度を確保できることを確認した。加えて、ピーニング処理の品質管理体制を構築した上で、グラインダ処理の代替としてピーニング処理を実機に適用した。その結果、従来のグラインダ処理に比べて施工時間を半減するとともに、粉塵・切り粉が発生しないことで現場の作業環境が改善することを確認した。



(a)施工状況



(b)施工部

写真 1 ピーニング処理  
Peening Work

\* 技術開発本部 技術開発センター

\*\* 機械・システム事業本部 機械工場 製造部

\*\*\* 機械・システム事業本部 機械工場 ディーゼル設計部



1. はじめに

船用ディーゼル機関( DE )は、台板や架構、掃気管、シリンダーフレームなどから構成されており、シリンダーフレームを除く構成部品は厚板の鋼材を溶接接合することで組み立てられている。一般的に溶接部は応力集中や引張残留応力の影響により疲労き裂発生の原因になりやすく、DE の構成部品においては溶接部の疲労強度向上策として、焼鈍処理やグライнда処理を行っている。グライнда処理は溶接止端部あるいは溶接部全体をグライндаで研削して形状を滑らかにすることにより溶接止端部の局所的な応力集中を低減させ、かつ疲労き裂の起点となるアンダーカット等の溶接きずを除去することで溶接継手の疲労強度を向上させる方法であり、溶接部の疲労強度向上法として多くの場面で採用されている<sup>1)</sup>。

しかしながら、グライндаは回転振動工具であり、長時間にわたって仕上げ処理を行う場合には作業性が低下することや、粉塵や切り粉の発生により作業環境が悪化することなどが懸念される。

一方で、材料表面を何らかのツールで叩くことにより形状を滑らかにし、圧縮の残留応力を付与させ疲労強度を向上させる技術としてピーニング処理があり、例えば、超音波ピーニング( Ultrasonic Impact Treatment : UIT )<sup>2)</sup>や、可搬型エア式ニードルピーニング( Portable Pneumatic Needle-Peening : PPP )<sup>3)</sup>による手法が最近注目されている。ピーニング処理はグライнда処理と比較して処理速度が速く、技能や経験を有しない人でも施工が可能で、金属の切り粉や粉塵を飛散させず、作業環境を悪化させることなく疲労強度を向上させる技術であり、船体構造<sup>4)</sup>や橋梁<sup>5)</sup>などに対して適用されつつある。しかしながら、ピーニング処理後に過大な負荷がかかると、疲労強度向上効果が低下する可能性がある。そのため、荒天時などに降伏応力程度までの過大な荷重を受ける船体構造に対しては、適用部位を限定することにより、持続的な効果を得ることができる<sup>6)7)</sup>。また、ピーニング処理は局所的な打撃を繰り返すことから、処理後の金属表面には打撃痕が残って凹凸が生じ、大きな凹凸や、鋭利な形状のものが残された場合には、それを起点にして疲労き裂が発生することがある<sup>8)</sup>。そのため、残留応力計測やピーニング処理条件設定、外観検査など施工管理が重要となる<sup>1)9)</sup>。

三井造船では、作業性の向上や作業環境の改善の観点から、グライнда処理により疲労強度を向上させている DE 架構の継手に対し、その応力状態からピーニング処理で代替可能と考えられる箇所を選定し、ピーニング処理の適用を検討した。

適用に際しては、ピーニング処理とグライнда処理の施工時間を比較して、ピーニング処理の導入のメリットを確認した。また、ピーニング処理の特徴を評価すると共に、実機の最大応力も考慮した疲労試験により、ピーニング処理がグライнда処理と同程度以上の疲労強度を有することを確認した。さらに、DE 架構への適用のための品質管理体制を構築して、当社 DE のライセンスと船級協会より承認を取得し、実機への適用を開始した。

2. ピーニング処理の適性評価

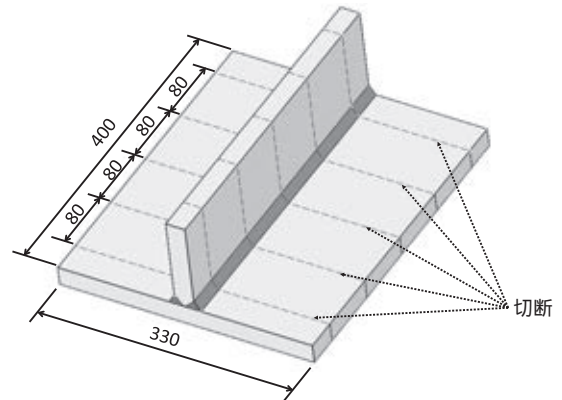
ピーニング処理をグライнда処理の代替技術として適用するにあたり、ピーニング処理がグライнда処理より作業性が向上し、疲労強度向上効果が同程度以上となる必要がある。そのため、DE 架構のグライнда処理部である角継手を荷重伝達型の T 継手と見なして 3 点曲げの疲労試験を実施した。

2.1 試験体

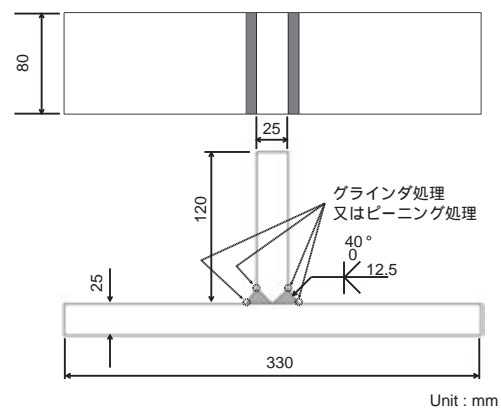
T 継手の試験体形状を図 1 に示す。主板( フランジ )及び付加板( ウェブ )は板厚 25 mm の KA 材( 軟鋼 )を、溶接ワイヤは 12 mm のフラックスコアードワイヤを用いる。この鋼材を用いて、半自動 CO<sub>2</sub> アーク溶接による 3 パス 2 層の部分溶込み溶接を行い、溶接長 400 mm の施工試験体を製作した。溶接条件を表 1 に、供試鋼材の化学成分及び機械的性質を表 2 に示す。

表 1 溶接条件  
Welding Conditions

パス数	アーク電流 [A]	アーク電圧 [V]	溶接速度 [cm/min]
1 パス目	290 ~ 300	34 ~ 35	25 ~ 26
2 パス目	同上	同上	42 ~ 43
3 パス目	同上	同上	51 ~ 52



(a) 施工試験体



(b) 疲労試験体

Unit : mm

図 1 試験体形状  
Test Specimen

表2 KA 材の化学成分及び機械的性質  
Chemical Composition and the Mechanical Property of KA Material

(a) 化学成分				
化学成分 [%]				
C	Si	Mn	P	S
0.16	0.14	0.71	0.015	0.007

(b) 機械的性質		
降伏点 [N/mm <sup>2</sup> ]	引張強さ [N/mm <sup>2</sup> ]	伸び [%]
292	440	32



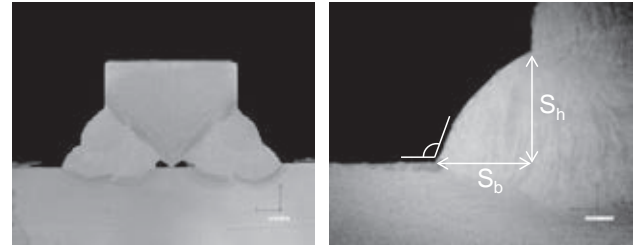
写真2 PPP 装置  
Appearance of Portable Pneumatic Needle-Peening

施工試験体の溶接止端部をピーニング処理又はグラインダ処理した後、80 mm 間隔に切り出した試験体を疲労試験体とした。

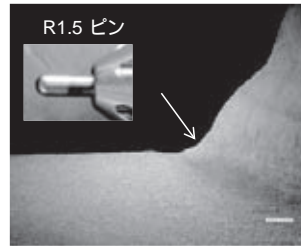
## 2.2 施工試験

ピーニング処理がグラインダ処理と比較して作業性が向上することを確認するため、図1(a)に示す施工試験体の4箇所の溶接止端部を対象として、グラインダ処理及びピーニング処理の施工試験を実施し、施工時間を比較した。

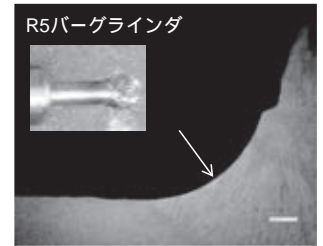
ピーニング処理には、UITと比較すると作業性が落ちる可能性があるものの、工場で使用しているグラインダ処理と同じ圧縮エアが動力源であり、比較的安価に導入できるPPP装置(写真2)を適用した。PPPは、溶接後に引張応力下にある溶接止端部に対して、装置の先端に取り付けられた金属ピンで連続的に打撃して止端形状を滑らかにし、塑性変形に伴う圧縮残留応力を導入することにより疲労強度を向上させることができる。なお、金属ピンの先端の半径は1.5 mmであり、エア流量110 l/min、圧力0.4~0.6 MPa、溶接線に沿った処理速度は装置販売元の推奨速度300 mm/minで施工を行った。また、ピーニング処理では溶接止端部巻き込み防止のため事前にグラインダを用いて溶接止端部を切削する(クリーニング処理)場合もあるが<sup>10)</sup>、PPPでは通常は必要としない。一方、グラインダ処理は当該板厚に対して通常実施される形状、即ち溶接止端部の曲率



(a) As-weld



(b) ピーニング



(c) グラインダ

写真3 マクロ試験体  
Macrostructure of Test Specimen

半径が5 mmとなるように施工した。用いた工具は先端半径5 mmの球型の超硬バーで、無負荷時回転数は25 000 rpmである。

施工時間を比較した結果、4箇所の合計の施工時間はグラインダ処理が13分56秒(836秒)、ピーニング処理が5分57秒(357秒)であり、ピーニング処理はグラインダ処理の半分以下の時間で実施でき、作業性が大幅に向上することを確認した。また、粉塵・切り粉が発生しないことから作業環境も改善されたと考えられる。

## 2.3 ピーニング処理が溶接止端部に及ぼす影響

ピーニング処理が溶接止端部に及ぼす影響を確認するため、疲労強度の向上に寄与する要因となる溶接止端形状及び残留応力を測定した。

### 2.3.1 溶接止端形状

施工した溶接止端部の形状及び応力集中の傾向を確認するため、当社で開発したレーザを用いた2次元の溶接形状評価装置を用いてピーニング処理、グラインダ処理及び施工前である溶接まま(As-weld)の止端形状を測定し、測定した止端形状を基に線形弾性応力解析を実施した。解析モデルは構造対称性を考慮して、1/4対称モデルとした。要素には6面体1次要素を用い、溶接止端部のメッシュサイズは0.1×0.1×0.1 mmとした。溶接部のマクロ写真を写真3、解析結果を図2に示す。また、止端形状の測定結果と解析結果より算出した応力集中係数を表3に示す。

測定結果より、余盛角に大きな違いは見られないが、止端曲率半径はAs-weldが0.5 mm、ピーニング処理及びグラインダ処理はそれぞれ1.8 mmと5.0 mmであり、溶接止端部に発生する応力集中は止端曲率半径が小さくなるに従い、グラインダ処理<ピーニング処理<As-weldの順に高くなっている。この結果は疲労設計曲線の傾きを-1/3(一般的な溶接継手の傾き)と仮定した場合、疲労寿命はAs-weldと

表3 止端形状測定結果  
Measured Results of Weld Toe

	止端半径 [mm]		余盛角 [°]		脚長 [mm]				応力集中係数
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	S <sub>n</sub>		S <sub>b</sub>		
					平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	
As-weld	0.5	0.2	119.7	6.5	12.6	0.5	9.1	0.5	3.9
ピーニング	1.8	0.3	117.2	6.2	13.8	0.6	9.7	0.7	2.8
グラインダ	5.0	0.3	111.9	4.3	16.8	0.5	12.8	0.7	2.0

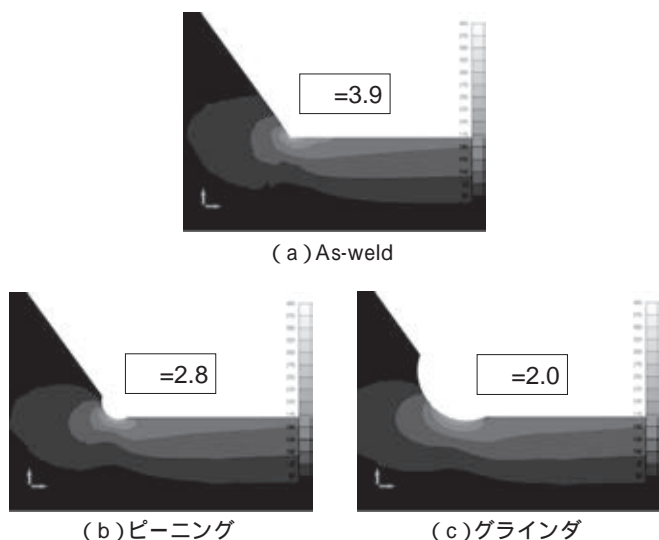


図2 応力解析結果  
Results of Stress Analysis

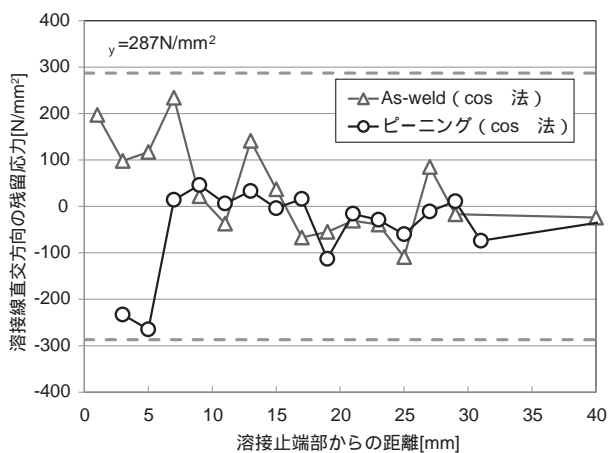


図3 溶接線直交方向の表面残留応力分布  
Distribution of Residual Stresses of Direction at Right Angles to Weld Lines

比較してピーニング処理は2.7倍、グラインダ処理は7.4倍長くなる。よって、グラインダ処理ほどではないが、ピーニング処理の場合にも形状改善効果が期待できると考えられる。

2.3.2 残留応力

ピーニング処理により圧縮残留応力が付与されているか確認するため、溶接止端部近傍の残留応力をX線回折法(cos法及びsin<sup>2</sup>法)により測定した。溶接線直交方向の表

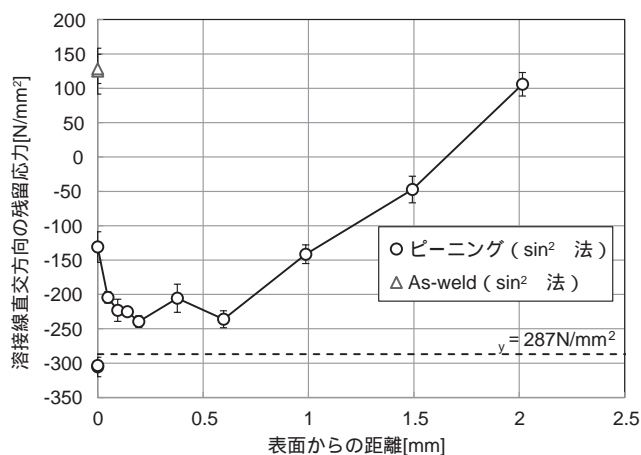


図4 板厚方向の残留応力分布  
Distribution of Residual Stresses of Through-Thickness Direction

表4 疲労試験ケース  
Case of Fatigue Test

試験体の種類	処理方法
As-weld	溶接まま
ピーニング	溶接止端部のピーニング処理
グラインダ	溶接止端部のグラインダ処理

面応力分布を図3に、電解研磨にて調整しながら測定した板厚方向の応力分布を図4に示す。測定結果より、ピーニング処理前後では、溶接止端部近傍の残留応力が引張側から圧縮側に大きく変化している。また、ピーニング処理後は表面から深さ1.6mmまで圧縮残留応力が付与されている。

2.4 疲労試験

疲労試験ケースを表4に示す。ピーニング処理、グラインダ処理に加え、疲労強度向上効果の指標としてAs-weldの合計3ケースを対象とした。

疲労特性の評価にはステアケース法<sup>11)</sup>を用いた。DE運転時の当該継手部の応力状態は、適用部位や機種により異なるため、基本的な条件として、1サイクル中の応力の最大値と最小値の比である応力比は0とした。なお、ピーニング処理については、不利になると考えられる圧縮応力場に対し、DE運転時に想定される最大の圧縮応力120 N/mm<sup>2</sup>と十分に余裕のある応力範囲の試験も実施することとし、比較のため、同じ条件下でAs-weldの試験も実施した。T継手試験体の試験機取り付け状態を図5に示す。繰返し速度は20 Hzとし、試験温度は常温、試験環境は大気中である。



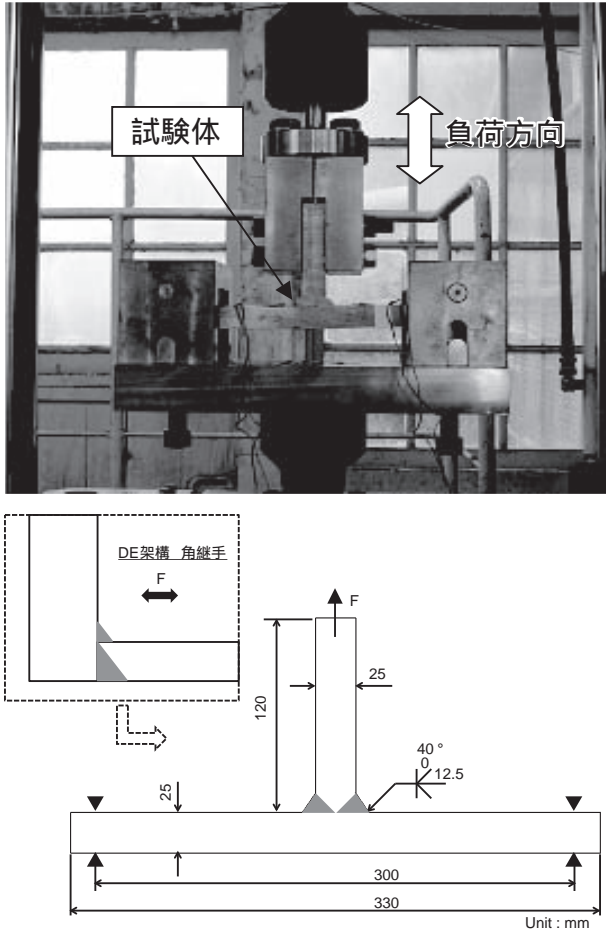


図5 試験体の試験機取り付け状態  
State of Attached Specimen to Testing Machine

疲労試験結果を図6に示す。縦軸の応力範囲の応力値については、応力集中部である溶接止端部から0.4t及び1.0t離れた点の応力を外挿してホットスポット応力を求める手法<sup>12)</sup>を用いて算出している。参考までにグラインダ処理及びピーニング処理の疲労強度である $2 \times 10^6$ 回の疲労強度が $112 \text{ N/mm}^2$ となる設計疲労曲線FAT112<sup>12)</sup>も併せて示す。

ピーニング処理では、最大ホットスポット応力が $270 \text{ N/mm}^2$ となる荷重を与えているが、グラインダ処理と同程度以上の疲労寿命を有することが確認できる。また、 $2 \times 10^6$ 回を打ち切り限界としてステアケース法により評価した疲労強度にて、打ち切り限界確認試験( $1 \times 10^7$ 回を打ち切り限界とした疲労試験)を3体ずつ実施した結果を表5に示す。同応力範囲 $180 \text{ N/mm}^2$ において、ピーニング処理は3体とも破断していないが、グラインダ処理は1体破断しており、ピーニング処理はグラインダ処理と同程度以上の疲労強度向上効果を持つことが確認できる。また、ピーニング処理した試験体の疲労強度は、As-weldの1.8倍程度である。なお、圧縮応力場の試験結果については、As-weldは1体のみ $9.6 \times 10^6$ 回で破断し、その他は未破断であるが全ての試験体でき裂が発生した。一方で、ピーニング処理は $1 \times 10^7$ 回載荷してもき裂が発生せず、導入した圧縮残留応力の消失は少ないと考えられる。

表5 確認試験の結果  
Results of Verification Test

	応力範囲 $h_s$ [ $\text{N/mm}^2$ ]	1体目	2体目	3体目
As-weld	90			
ピーニング	180			
グラインダ	180			×

: 未破断, × : 破断

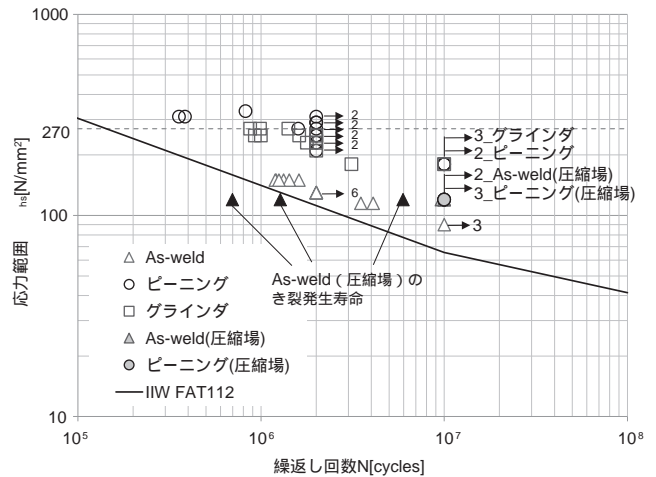


図6 疲労試験結果  
Results of Fatigue Test

### 2.5 ピーニング処理施工速度の影響

ピーニング処理の施工速度の影響を確認する目的で、メーカー推奨の施工速度 $300 \text{ mm/min}$ 、1.5倍の速度 $450 \text{ mm/min}$ 、2倍の速度 $600 \text{ mm/min}$ でピーニング処理し、外観及び疲労強度を比較した。

処理後の溶接止端部の元の谷線が見えるかどうかの確認には磁粉探傷検査(Magnetic Particle Testing: MT)を用いて擬似的な指示模様を確認することとした。600 mm/minに関してはほぼ全線で擬似指示模様が発生し、450 mm/minでは溶接線に対して半分程度擬似指示模様が確認された。

また、450 mm/minで施工した試験体については、2.4で評価した $300 \text{ mm/min}$ で施工した試験体の疲労強度と同条件の応力範囲 $180 \text{ N/mm}^2$ 、応力比 $R=0$ 、繰返し速度 $20 \text{ Hz}$ で疲労試験を3体実施した。試験の結果、3体全て未破断であり $300 \text{ mm/min}$ で施工した試験体と同程度の疲労強度を有していることを確認した。以上より、メーカー推奨の施工速度 $300 \text{ mm/min}$ は十分な裕度があると言える。

## 3. 船舶ディーゼル機関 架構への適用

### 3.1 品質管理体制の構築

溶接形状により作業性が大きく変わることや、合格基準が分かりづらく施工者での判断が難しい等の問題を解決するため、品質管理基準を設定したピーニング処理を、図7に示す施工手順に従い実施すると定め、以下に施工方法・条件及び検査方法を示す。

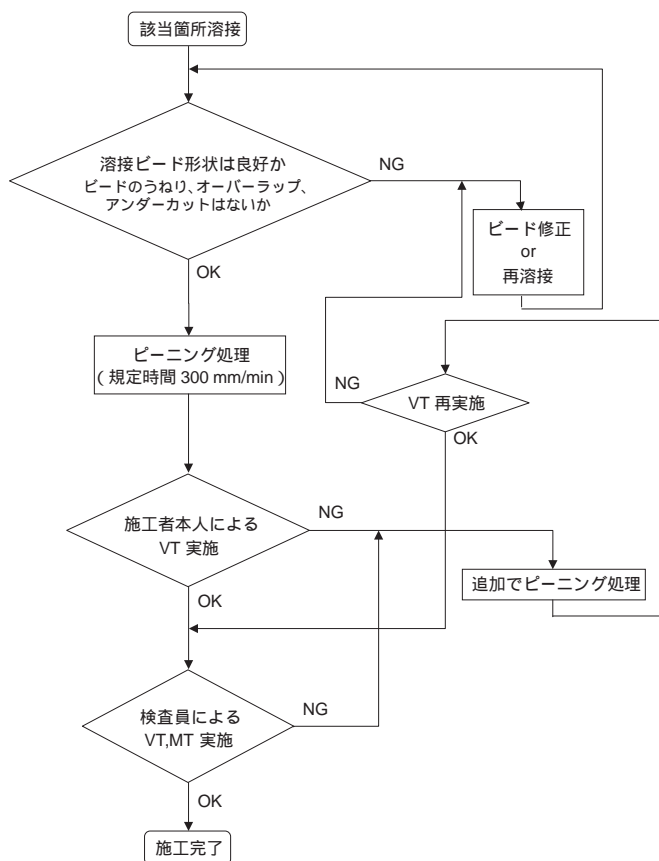
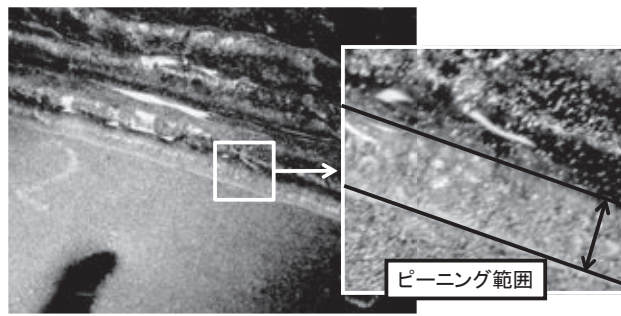
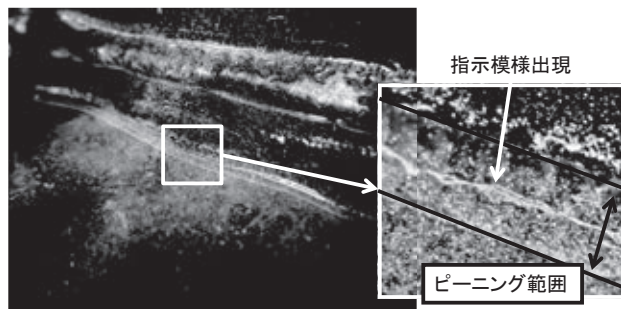


図7 ピーニング処理の施工手順  
Procedures of Peening

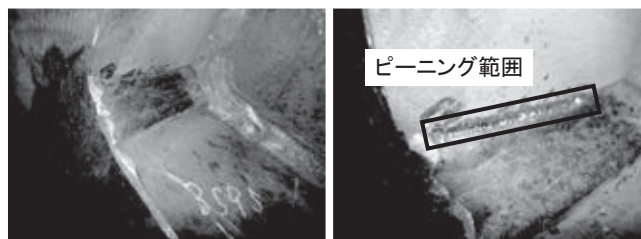


(a)合格例



(b)不合格例

写真4 磁粉探傷検査合格基準  
Acceptability Criterion of Magnetic Particle Testing



(a)施工前

(b)施工後

写真5 ピーニング処理の施工状況  
State of Peening Work

(1) 施工方法・条件

施工方法は、装置製造元である東洋精鋼株式会社の「エアースキッドピーニング作業要領書」を基にした。初めに、施工部を金ブラシやタガネ等でスケールやスラグを除去する。次に、母材に対して 60 ~ 80°, 溶接方向に対して ±10° になるようにピーニングヘッドの金属ピンの先端を施工部(溶接止端部)に押しつけ、ピーニングヘッドを左右に往復運動させながらピーニング処理を実施する。ピーニング処理の時間は300 mmの長さに対して1分間以上(エア圧力 - エア流量: 0.5 MPa - 140 /min)を目安とする。施工速度は施工者が自主管理する。

(2) 検査方法

施工部の仕上がり確認に関しては、施工者による目視検査 (Visual Testing: VT)に加えて検査員によるVT及びMTの二段階で実施する。まず、施工者によるVTでは、溶接止端部の谷線に沿ってピーニング痕が連続して付与されており、溶接止端部の元の谷線が見えないことを確認する。谷線が見えている場合は再度ピーニング処理を行う。判定については、以下のチェック項目と合格及び不合格例を基に行う。不合格の場合は、再度ピーニング処理を行い、施工者によるVTを行う。

チェック項目を以下に示す。

- ・ 不連続部がないこと
- ・ 溶接止端部からずれて打っていない、溶接止端部の巻き込

- ・ みがいないこと
- ・ 溶接欠陥、切欠き、傷等の異常がないこと
- ・ アンダーカット、オーバーラップが残っていないこと
- ・ ピーニング痕が不均一でなく、連続して滑らかな溝が形成されていること

施工者によるVTが合格した後、検査員によるVT及びMTを行う。VTについては施工者と同様に判定し、MTについては大きさによらず擬似指示模様がないことを合格基準とする。判定の例を写真4に示す。不合格と判定された場合は、再度ピーニング処理を行い、施工者によるVTと検査員によるVT、MTを行う。

3.2 承認取得

品質管理基準に沿ったピーニング処理の施工要領書を作成し、DEのライセンサであるMDT (Man Diesel & Turbo) 社の承認を得た後、船級協会の承認を取得し、DE架構の一部溶接部にピーニング処理を適用した。

### 3.3 適用状況

DE 架構の実構造物におけるピーニング処理の施工部を写真 5 に示す。試験体と同様に MT 実施後、X 線回折法 (cos 法) により残留応力を計測し、圧縮残留応力が付与されていることを確認している。ピーニング処理の施工時間はグラインダ処理の半分であり、振動作業を削減させることから、現場の作業性は向上した。また、粉塵や切り粉が発生しないことから作業環境も改善した。

### 4. おわりに

作業性の向上や作業環境の改善の観点から、グラインダ処理により疲労強度を向上させている DE 架構の継手に対し、その応力状態からピーニング処理で代替可能と考えられる箇所を選定し、以下の課題に取り組み成果を得た。

#### 作業性

ピーニング処理とグラインダ処理の施工時間を比較して、ピーニング処理がグラインダ処理と比べて粉塵・切り粉もなく施工時間が半減し作業性の向上とともに現場作業者の作業環境を改善することを確認した。

#### 継手の疲労強度

DE 架構の角継手を T 継手と見なして試験体を製作し、実機の応力状態を想定した疲労試験によりピーニング処理がグラインダ処理と同程度以上の疲労強度を有することを確認した。

#### 品質管理

ピーニング処理箇所の品質を保証するため、施工要領を策定し、施工者と検査員による品質管理体制を構築して、当社 DE のライセンスと船級協会より承認を得て実機への適用を開始した。

### 参 考 文 献

- 1) 一般社団法人 溶接学会 溶接疲労強度研究委員会：溶接構造の疲労，(2015)，産報出版
- 2) 島貫．外：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)，p.100
- 3) 苗木：溶接止端部にき裂を有するステンレス鋼のピーニングによる疲労限度向上とき裂の無害化，圧力技術，53，3

- 4) 三井造船：鉱石運搬船“BRASIL MARU (ぶらじる丸)”，三井造船技報，193(2008-2)，p.42
- 5) 風野．外：羽田空港 D 滑走路のジャケット工法の技術 - 世界初のジャケット式空港 - ，新日鉄エンジニアリング技報，01，(2010)，p.6
- 6) 原．外：船体構造における超音波ピーニングを用いた疲労強度改善に関する研究 第 1 報，日本船舶海洋工学会講演会論文集，10(2010-6)，p.599
- 7) 出口．外：船体構造における超音波ピーニングを用いた疲労強度改善に関する研究 第 2 報，日本船舶海洋工学会講演会論文集，10(2010-6)，p.603
- 8) 森．外：UIT を施した面外ガセット溶接継手の疲労強度に対する施工時応力レベルと応力比の影響，土木学会論文集 A1(構造・地震工学)，67，(2011)，p.421
- 9) 井上．外：エアードルピーニングによる面外ガセット溶接継手の疲労強度向上対策，東骨技報，57，p.38
- 10) 田井．外：ハンマーピーニング処理による面外ガセットの溶接止端部の疲労強度改善，土木学会論文集 A1(構造・地震工学)，67，2(2011)，p.396
- 11) 一般社団法人 日本機械学会：統計的疲労試験方法 JSME S 002，(1981)
- 12) A. Hobbacher：Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components, International Institute of Welding, doc. XIII-2151r4-07/XV-1254r4-07，(2008)

#### [ 問い合わせ先 ]

技術開発本部 技術開発センター  
TEL 0863 - 23 - 3021 赤瀬 雅之



八木 伸暁 木村 陵介 長崎 俊憲 下野 大地



# 樹脂摺動部材の長寿命化に向けた DLC コーティング技術の開発

滝澤 一樹\* 石原 修二\* 國次 真輔\*\*

## Development of DLC Coating Techniques on Plastics for Improving Wear-Resistance

Kazuki TAKIZAWA, Shuji ISHIHARA, Shinsuke KUNITSUGU

Engineering plastics are widely utilized for sliding parts of transportation or industrial machinery. Since the durability of the machinery generally depends on the lifetime of the plastic materials, improving the wear-resistance makes it possible to realize qualitative advantages and differentiation of mechanical products. Diamond-like carbon (DLC) is well-known as functional coating films with a low-friction coefficient and anti-wear properties, but in a conventional plasma-enhanced chemical vapor deposition (P-CVD) technique, the coatings of large plastic parts with a complex shape were difficult because of the limitations of temperature and inhomogeneous ion energy. Mitsui Engineering & Shipbuilding Co., Ltd. developed a technology to form the DLC films with good sliding properties on relatively-large plastics using a physical vapor deposition (PVD) technique that can be easily mass-produced. The technology features controllable ion energy by precisely monitoring electron temperatures in a plasma using an optical emission spectroscopy. As a result, it enhanced the wear-resistance of engineering plastics by more than 15%, and its use is expected to expand to various mechanical parts in the future.

樹脂材料は輸送用機器や産業用機器などの摺動部位に用いられているが、耐摩耗性を向上させることができれば機器の差別化・機能強化につなげることができる。ダイヤモンドライクカーボン(DLC)は低摩擦係数を有する耐摩耗性コーティング膜として知られているが、従来技術では高分子材料への適用は主に化学気相堆積(プラズマCVD)法で行われており、三次元形状の大型部品へ適用する場合には制限があった。三井造船では比較的大型部品への適用、かつ、量産化が可能な物理的気相堆積(PVD)法に着目し、そのプラズマを発光分光法を用いて高い精度でモニターし、イオンエネルギーを制御することにより、摺動性が高く比較的高硬度なDLC膜を低温条件で絶縁材料上に形成する技術を開発した。また、当技術を実際に種々のエンジニアリングプラスチックに適用することにより、その耐摩耗性能が15%以上向上する結果も得られており、今後様々な機器への応用展開が期待できる。

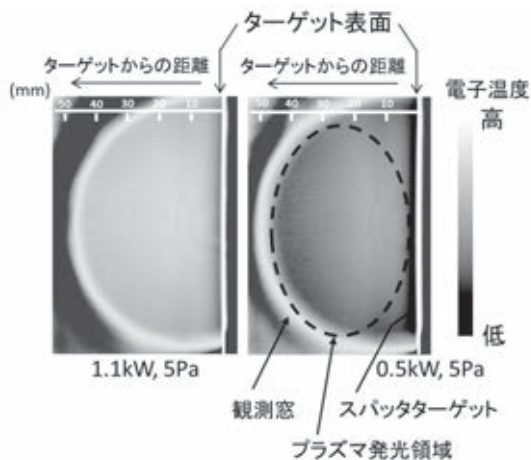


図1 電子温度分布  
Profile images of electron temperature

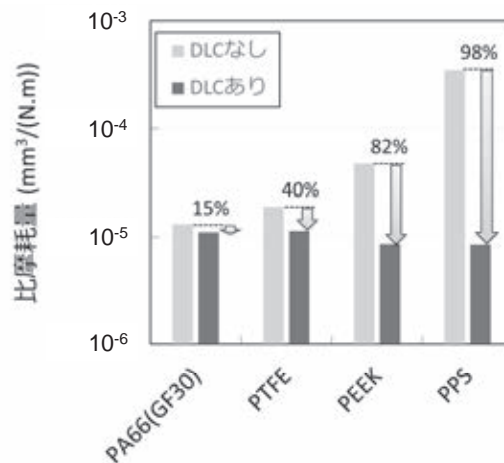


図2 比摩耗量の比較  
Comparison of wear rate

\* 技術開発本部 技術開発センター

\*\* 岡山県工業技術センター 研究開発部

## 1. はじめに

### 1.1 樹脂摺動部材への DLC 膜の適用

ダイヤモンドライクカーボン(DLC)膜は低摩擦係数を有するほか、耐候性、耐食性などに優れる特長があり、比較的相手材攻撃性の低い硬質被膜であるため、自動車等の輸送用機器を始めとして産業機械などの摺動部品の耐摩耗性向上による機器の長寿命化のために広く用いられてきている<sup>1)</sup>。また、DLC 膜は主に炭素原子と水素原子から構成されるため、生体適合材料としての応用研究も数多くなされ、一部では実用化に至っている<sup>2)</sup>。三井造船においても、製品の差別化及び機能強化に向けた応用研究を続けており、これまでに主にプラズマイオン注入法を用いた複雑形状物への DLC 膜の適用について検討し、密着性の良好な DLC 膜が形成できる結果を得ている<sup>3)4)</sup>。

近年、エンジニアリングプラスチックやその複合樹脂材料は機器の軽量化などを目的として、様々な機械製品に用いられている<sup>5)</sup>。例えば、当社ガス圧縮機製品においては耐摩耗性が要求される摺動部分に種々の複合樹脂材料が用いられている。これまで DLC 膜は主に樹脂摺動材料の相手材となる金属表面にコーティングする機会が多かったが、現状の DLC は 10 μm 以下の薄膜であるため、適用箇所にもよるが一般に機器そのものよりも寿命が短くなる。メンテナンスサイクルの長期化のためには、摺動部樹脂材料の摩耗量低減が必要であるが、メンテナンス時の交換が困難な金属材料表面に DLC 膜をコーティングするよりも、メンテナンス時の交換が容易な樹脂材料側へのコーティングの方が期待できる。そこで本研究では樹脂材料上に摺動用途向けの比較的硬度の高い DLC 膜を形成する方法について検討を行った。

### 1.2 樹脂材料上への DLC 膜形成の課題

過去の研究でも DLC 膜をゴムや樹脂のような高分子材料上にコーティングした事例はあり、DLC コーティングを行うことにより、摺動部材としてよく用いられる PTFE 並に摩擦係数が低下し、耐摩耗性も向上するデータが得られている<sup>6)7)</sup>。しかしながら、従来高分子材料へのコーティングで用いられていた高周波プラズマ化学気相堆積(Chemical Vapor Deposition; CVD)法では、三次元形状の大型部品など、複雑形状物へのコーティングが困難であったり、そのような部材形状に対して量産性に課題があった。

高周波プラズマ CVD 法では、高周波電力を印加するカソード電極に樹脂基材を設置することで、接地されたアノード電極との間に容量結合プラズマが生成される。生成された高周波プラズマによるセルフバイアス電圧がカソード側に発生するため、電圧降下によりプラズマ中のイオンが樹脂基材の方へ引き込まれ、イオン衝撃エネルギーを利用して樹脂材料上に DLC 膜が形成される。通常この方法ではイオンエネルギーによりカソード電極が非常に高温になるが、プラズマをパルス化することや、カソードを水冷することにより温度上昇を防ぐことができる。

このような高周波プラズマ CVD 法では、カソード電極周辺に形成されるシース厚以下のサイズの部品であれば処理可

能であるが、三次元形状の大型部品ではカソード電極上に配置してもセルフバイアス電圧の印加によるイオン衝撃効果は得られないため、成膜されたものは DLC 膜としては十分な硬度が得られないなど膜質の低下が生じる。

一方、物理気相堆積(Physical Vapour Deposition; PVD)法では一般的に DLC 膜の原料となるグラファイトターゲットがカソード電極に配置され、基材はカソード電極から離れたところに設置される。カソード電極近傍に生成されたプラズマによりターゲット材料が飛散して、そのカーボン粒子が対向して設置された基材に到達することでカーボンが堆積し膜が形成される。このような形態では基材の形状に関係なくターゲットに対向した面に対してイオンは照射されるので、基材の形状や設置方法に自由度が高く、大型部品の量産化が容易であると考えられる。

DLC 成膜で用いられる PVD 法はプラズマの生成方法により主に真空カソードアーク法とマグネトロンプラズマ法に分類される。

真空カソードアーク法はターゲット表面にアークプラズマを発生させ、ターゲットから生成したイオンをターゲット表面近傍に形成される電場により加速させて基材表面に照射する方法である。飛散したカーボン粒子のイオン化率が高く基材上に硬質の DLC 膜が形成されやすいが、基材の温度が上がるため、樹脂基材を用いる場合には基材に与えるダメージが顕著になる。

マグネトロンプラズマ法はターゲット近傍に低温のグロー放電プラズマを生成してターゲット材料を飛散させる方法であるが、真空カソードアーク法と比較してイオン化率が低い<sup>8)</sup>ため、DLC 膜の緻密化が進まず、硬質膜の形成が難しいとされている<sup>9)</sup>。DLC 膜を形成するためには膜へのイオン衝撃を増やすことが必要で、一般にはマグネトロンプラズマを形成するための磁場の配置を変えてプラズマの分布を変化させるなどの処置が取られる<sup>9)</sup>。この場合にもプラズマからのイオン照射により樹脂基材がダメージを受けることも考えられるので、基材に必要な以上のイオン衝撃を与えないようにイオンエネルギーの制御が必要になる。

以上、三次元大型形状の樹脂部材に DLC 膜をコーティングする方法について、それぞれの特徴を表 1 にまとめた。ガス圧縮機等の産業用製品で用いられる樹脂部材は比較的大型で三次元形状を有しており、このような複雑形状物に対して DLC コーティングを行うためには、従来行われていたプラズマ CVD 法に基づく手法では限界がある一方で、低コストで量産化するために PVD 法に基づく手法を用いる場合には、

表 1 樹脂材料上への DLC 成膜法の比較  
Comparison of techniques for forming DLC

	マグネトロン スパッタリング	真空カソード アーク	高周波プラズマ CVD
方法	PVD	PVD	CVD
絶縁物			
成膜温度		×	
大型部品質産性			×

樹脂材料にダメージを与えない低温コーティングを実現することに課題がある。

1.3 イオンエネルギー制御技術

マグネトロンスパッタリング法は樹脂基材上に DLC コーティングをするために有効な技術であると考えられるが、前述のように基材に照射するイオンエネルギーの制御が重要な課題である。一般に、マグネトロンプラズマで生成したグロー放電中に樹脂基材を設置したとき、その樹脂部材に入射するイオンのエネルギー  $E_i$  は、電子温度を  $T_e$ 、イオンの質量を  $M_i$ 、電子の質量を  $m_e$  とすると、

$$E_i = - T_e \cdot \ln\left(\frac{M_i}{2 m_e}\right) \dots\dots\dots(1)$$

で与えられる。式(1)から樹脂基材上に入射するイオンのエネルギーは基材周辺のプラズマの電子温度と関係があり、樹脂基材にイオンダメージを与えずに硬質な DLC 膜を形成するためには電子温度の正確な制御が必要である。

グロー放電プラズマの電子温度の計測法としてよく用いられる方法としてラングミュアプローブ法がある。本方法はプラズマ中に電極を挿入して、その電極の電位と電極を流れる電流との関係からプラズマ密度や電子温度、プラズマ電位を評価する方法である。しかし、プローブ電極の挿入によりプラズマにじょう乱が生じる制限があるだけでなく、堆積性のプラズマではプローブ電極に膜が堆積して正確な電流密度が評価できないなどの困難もある。また、マグネトロンプラズマではカソード周辺に磁場が形成されており、磁力線によりプローブ電極にトラップされる電子の軌道が影響を受けるため、精度の良い計測を行うことが困難であり、局所的に存在する磁場の中性点でのみの評価になるなど測定場所に制限がある。

トレーサガス発光分光 (TRG-OES) 法<sup>10)</sup>は数種類のトレーサガスの発光を観測することによりプラズマ中の電子温度を比較的正確に評価できる方法である。トレーサガスとして不活性な希ガスを少量添加するため、ほとんどプラズマに影響を及ぼすことはなく、非接触で電子温度の絶対値の評価が可能になる。これまでに塩素プラズマなどに適用することにより、その有効性が実証されている<sup>11)</sup>。本手法は数種類の希ガスの発光線を観測するため、プラズマの発光をレンズにより集光し、分光器等を用いて特定の波長だけを切り出して、希ガスの発光線の強度比を計測する。本手法ではレンズなどの光学系を用いることにより、高い空間分解能を得ることも可能である。

当社では TRG-OES 法の拡張として、CCD カメラと干渉フィルターを用いてプラズマ中の電子温度空間分布の情報を同時かつ簡便に計測する手法を開発した<sup>12)</sup>。本手法を用いれば、マグネトロンプラズマのカソード電極周辺にわたって電子温度の空間分布の情報を取得することができ、基材周辺のプラズマの電子温度をより詳細に調べることができる。すなわち、本手法を用いてマグネトロンスパッタリング条件下でプラズマの電子温度を計測し、制御することにより、大型三次元形状の樹脂部材に対して耐摩耗性 DLC 膜をコーティ

ングすることが可能になる。

本報では、まず初めに、DC マグネトロンスパッタリングによる DLC 膜コーティングの成膜条件の制御に TRG-OES 法が適用できるかどうかをラングミュアプローブで計測した電子温度と比較することにより確認した。次に、TRG-OES 法で得られたマグネトロンプラズマの電子温度の空間分布データと樹脂材料を模擬した絶縁性のガラス基材上に成膜した DLC 膜の膜質との相関を調べ、摺動性の良好な DLC 膜を得るために必要な条件を TRG-OES 法を用いて調べた。

2. 実験方法

2.1 成膜試験装置

図3は DLC 成膜に用いた成膜装置の概略図である。6 インチ (150 mm) のグラファイトターゲット周辺に DC マグネトロンプラズマを生成してターゲットから放出されたカーボンを基材上に成膜した。本研究の目的は絶縁性の樹脂材料上に DLC 膜をコーティングすることであるが、本実験では

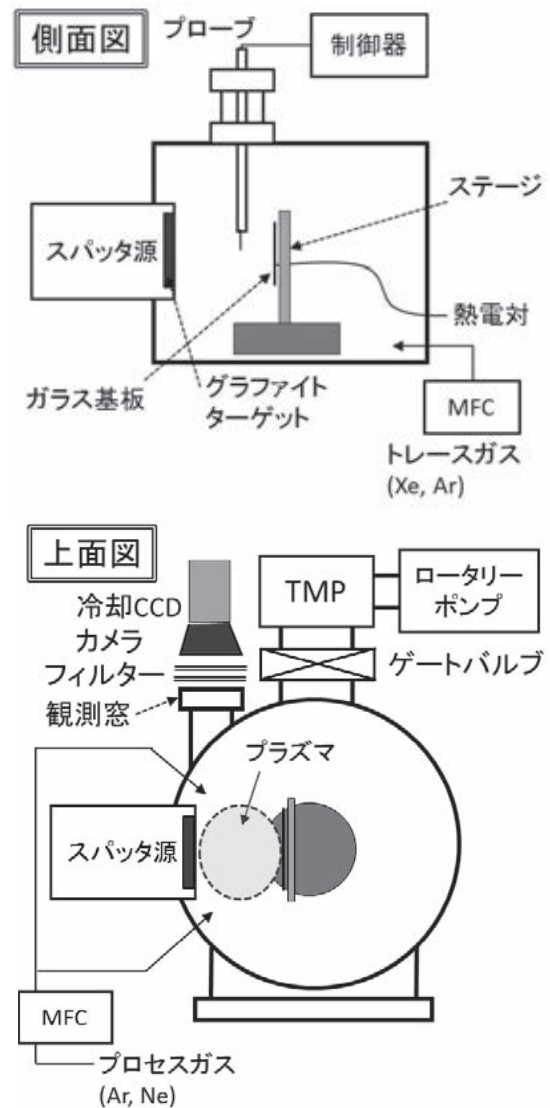


図3 成膜実験装置  
Experimental apparatus



まず樹脂材料の代わりにガラス基板を用いて、絶縁材料を模擬した基盤に DLC 膜を形成する試験を行った。ガラス基板は接地電位であるステンレス製のステージに固定され、ターゲット表面から 80 mm 離れた位置に固定されている。ステンレス製ステージには中央部にガラス基板温度計測用の穴が設けられており、成膜中のガラス基板の温度をシース熱電対を用いてプラズマ生成領域の反対側であるガラス基板の裏側に接触させて基板温度を測定した。プロセスガスには、Ne あるいは Ar ガスを流量 50 sccm で一定にしてターゲット後部よりチャンパー内に導入した。ガスの排気はターボ分子ポンプ (TMP) とロータリーポンプを用いて行い、TMP 前段にはゲートバルブが取り付けられており、成膜装置内のプロセスガス圧力は、マスフローコントローラ (MFC) により流量を一定にして排気速度を変化させることにより調整した。

本研究では、生成した DC マグネトロンプラズマをラングミュアプローブ及び TRG-OES 法を用いて評価した。主に、ラングミュアプローブではプラズマの電子密度と電子温度を計測し、TRG-OES 法ではプラズマの電子温度の空間分布を計測した。TRG-OES 法における希ガス原子の発光線の観測は、干渉フィルターを用いて波長選択を行い、ダイナミックレンジが 12 bit である冷却 CCD カメラを用いて、ターゲット横方向から行った。TRG-OES 法ではトレーサガスとして Ar や Xe を基板背面より少量添加し、Ne ガスをプロセスガスとして用いた場合にはそれぞれのガス流量を 1 - 5 sccm の範囲で調整した。Xe ガスはプラズマの電子温度を低下させるが、少量であるため、その影響はほとんど無視できる。

### 3. 実験結果

#### 3.1 電子温度分布

まず初めに、TRG-OES 法で計測した電子温度が既存のラングミュアプローブ法により計測したものと同一傾向が得られることを確認するために、同じプラズマ生成条件でそれぞれの方法により別々に計測を行った。

図 1 は Ar のガス圧力を 5 Pa で一定にしてターゲットに印加した電力を 0.5 - 1.4 kW で変化させたときのターゲット周辺に形成されるプラズマの相対的な電子温度分布の様子を示している。図中に記載された横軸方向の数値はグラファイトターゲット表面からの距離を示しており、ターゲットからおよそ 45 mm 程度までは比較的 S/N の良い計測ができていると思われるが、その外側の領域では円形の観測窓やターゲット自体からの反射光によりノイズが増大しているとみられる。電力が 0.5 kW の条件では電極から 30 mm 程度離れたところまで電子温度がやや高い領域が存在しているが全体的に電子温度が低くなっている。電力が増加するにつれ電子温度が高い領域がターゲットから離れたところでも高くなることが観測された。このように、ターゲット印加電力が高くなるとプラズマの電子温度も増加していくことが分かる。

図 4 はカメラ計測で得られた電子温度の空間分布の画像からターゲット中央部において、ターゲット面からの垂直方向の距離に対する電子温度の空間分布を示したものである。

Ne プラズマ及び Ar プラズマそれぞれにおいてターゲット電流を 2.0 A で一定にして、圧力を 2 - 8 Pa で変化させている。図の横軸はターゲット表面からの距離を示している。ここに示したとおり、Ne プラズマの場合には圧力が 2 Pa ではターゲットから 20 mm 離れたところで電子温度は 1.1 eV まで上がっており、圧力が高くなると電子温度が低下する様子が分かる。Ar プラズマの場合も同様で、5 Pa と 8 Pa の条件では電子温度は低くほとんど変化がなかったが、圧力が 2 Pa ではターゲットから離れたところまで全体的に電子温度が高くなっているのが分かる。

図 5 はラングミュアプローブ法で計測した電子温度と TRG-OES 法で計測した電子温度を比較したものである。図 5 (a) は圧力を 5 Pa 一定にしたときにターゲット電流を 0.5 - 2.5 A で変化させたときのもので、図 5 (b) はターゲット電流を 5 A で一定にしたときに圧力を 2 - 8 Pa で変化させたものである。それぞれ Ar 及び Ne プラズマ中で計測している。ここに示したとおり、電子温度の絶対値はやや異なるが、ターゲット電流が高い条件で電子温度が増加しており、また圧力が高い条件で電子温度が低下していることが分かる。TRG-OES 法で計測した電子温度の絶対値がやや低くなるのは、カメラで一方向から観測しているため、奥行方向の線積分値が計測されているためであると考えられる。本結果から、TRG-OES で計測した電子温度は相対的には正しくモニターできていることが分かった。

#### 3.2 DLC 膜のラマン分光計測

図 6 はスパッタリング法によりガラス基板上に成膜した DLC 膜のラマン分光スペクトルを示す。図 6 (a) は圧力を 5 Pa で一定にして電力を 0.5 - 1.4 kW で変化させたときのものであり、図 6 (b) は電流を 2.0 A で一定にして圧力を 2 - 8 Pa で変化させたときのものである。プロセスガスは Ar を用いたが、一条件のみ Ne で DLC コーティングを行った。図 6 からターゲットに印加する電力や圧力を変化させることによりラマンスペクトルの形状が変化することが分かる。

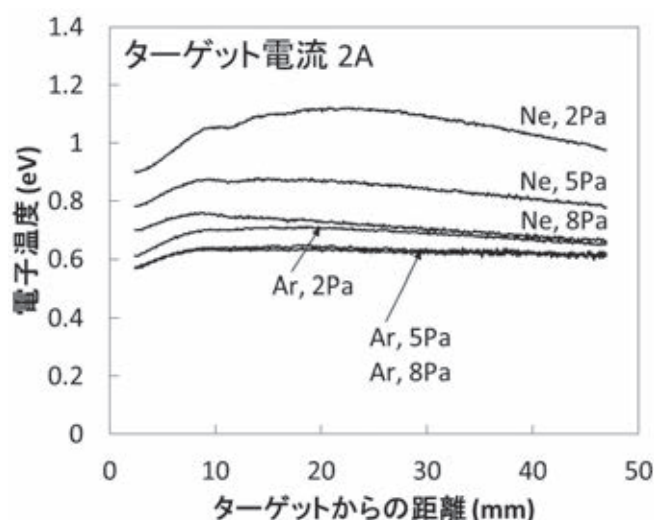


図 4 圧力の変化と電子温度分布  
Profiles of electron temperature against pressure

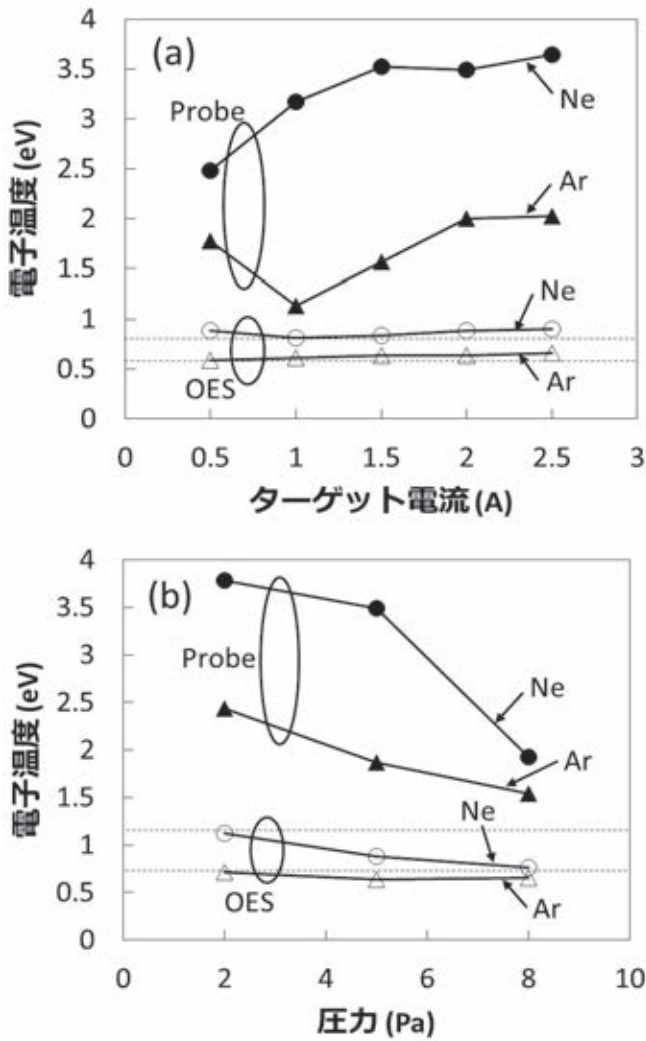


図5 電子温度の比較

Electron temperature as a function of target current and pressure

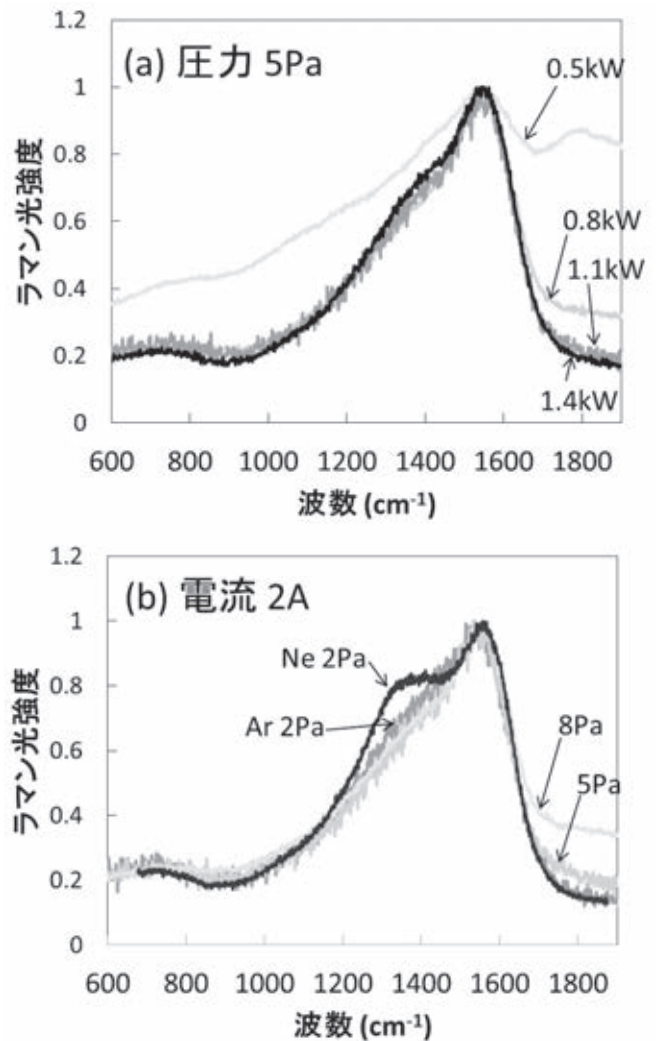


図6 ラマンスペクトル  
Raman spectra

圧力が5 Paの条件では、電力が0.5 kWでは全体的にブロードな蛍光が観測された。この蛍光の由来は不明であるが、不完全な DLC の結合に由来するものと考えられる。電力が高くなるにつれ 1550 cm<sup>-1</sup> 付近に G バンドと呼ばれるグラファイトの六員環構造の面内伸縮振動を示す急峻なピークがはっきりと観測されるようになる。1.1 kW 以上では 1600 cm<sup>-1</sup> 付近の蛍光もほとんど観測されなくなっており、DLC の緻密化がより進行したと考えられる。一方、電流を 2 A で一定にして圧力を 8 Pa から 2 Pa へ下げていったときも同様に 1600 cm<sup>-1</sup> 付近の蛍光が減少していくのが観測された。それに加えて、G バンドのピーク位置も低波数側にシフトしていった。図7はそれぞれの条件における G バンドのピーク位置を示している。圧力の 8 - 2 Pa の変化に対して G バンドのピークは 1553 - 1540 cm<sup>-1</sup> で単調に変化していることが分かる。前述のとおり、DLC 膜は一般にダイヤモンド結晶構造 (sp<sup>3</sup>) 成分とグラファイト結晶構造 (sp<sup>2</sup>) 成分を有する非晶質膜であるが、単結晶グラファイトのラマンスペクトルは 1580 cm<sup>-1</sup> にピークを有する<sup>13)</sup>。それに対して低圧力でのスペクトルが低波数側にシフトしているのは、膜中の sp<sup>2</sup>/

sp<sup>3</sup> の混在比率が変化したためであると考えられる。

プロセスガスが Ne の場合には G バンドに加えて 1350 cm<sup>-1</sup> 付近に D バンドとみられるピークも観測された。D バンドのピークはグラファイトの六員環構造の欠陥構造からの散乱光であることが知られており<sup>14)</sup>、Ne プラズマにより DLC 膜がダメージを受けていることが考えられる。Ar プラズマで成膜した場合にはガラス基板の温度は 70 °C 以下であったが、Ne プラズマの場合には 100 °C 程度まで基板温度が上昇していた。電子温度計測の結果では Ne プラズマは高い電子温度を有しており、イオンフラックスの増大が DLC 膜のダメージを誘発していることが考えられる。

以上から分かるように、従来の DC マグネトロンスパッタリング法を用いても絶縁性のガラス基板上に良質な DLC 膜が形成できていることが分かった。しかしながら、Ne プラズマの場合には形成した DLC 膜がダメージを受けたり、圧力が高い条件や電力が小さい条件では緻密さの低い DLC 膜が形成されるなど、そのプロセスウィンドウは比較的狭いものと考えられる。そのため、本手法により DLC 膜を形成するためには正確なプラズマの電子温度のモニタリング手法が必要で

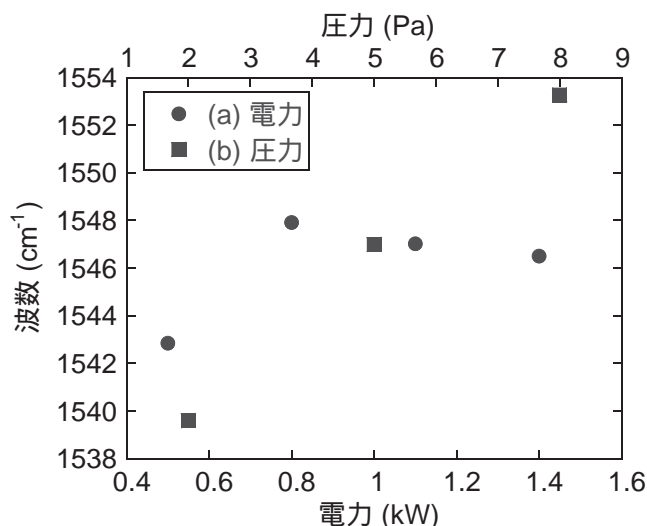


図7 Gバンドのピーク位置  
Peak positions of G-band in Raman spectra

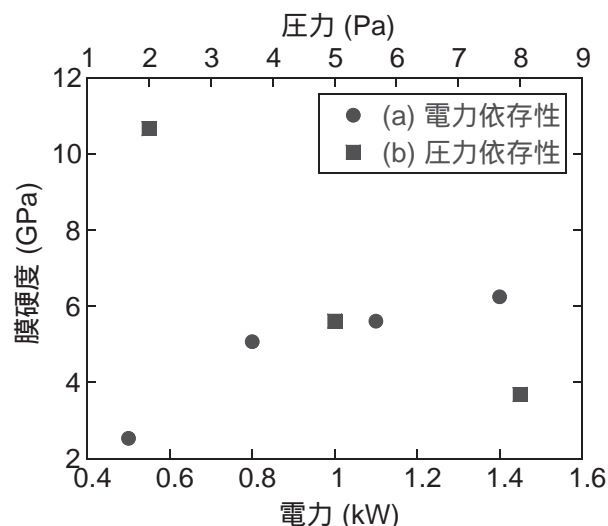


図8 膜硬度  
Hardness of DLC films

あり、当社において開発した電子温度の空間分布を評価する手法は DLC 成膜のためには欠くことができない技術となる。

### 3.3 ナノインデンテーション法による硬さ試験

DLC の膜特性を評価する一つの指針として、DLC 膜の硬さを評価する方法がある。DLC 膜の密度と硬さには相関があることが知られており<sup>15)16)</sup>、硬い DLC 膜ほど緻密な DLC 膜が形成されていることが考えられる。摺動用途で用いられる DLC 膜には摺動環境に耐えられる硬さが必要である。本節では、DC マグネトロンスパッタリング法により得られた DLC 膜の硬さについて議論する。

DLC 薄膜の硬さの評価方法として、ナノインデンテーション法がよく用いられる。ナノインデンテーション法の詳しい測定原理については本報では省略するが、ダイヤモンド圧子により DLC 膜表面に数十 nm 程度のインデント(窪み)をつけ、その塑性変形量及び弾性変形量から膜硬度やヤング率を評価する方法である。本研究では、スパッタリング法により成膜した DLC 膜の膜硬度をナノインデンテーション試験により評価し、ターゲット印加電力やガス圧力を変えたときに膜硬度がどのように変化するかについて調べた。

図8はナノインデンテーション試験により評価した DLC 膜の硬さとターゲット印加電力及び圧力との関係を示す。図中の(a)は圧力が5 Pa のときの試験結果であるが、電力が0.5 kW のときには2.5 GPa の硬さであったのに対し、1.4 kW まで増加させたとき DLC 膜硬度は単調に増加していき6.2 GPa まで増加した。一方、図中の(b)は圧力を2 - 8 Pa で変化させたときの DLC 膜の硬さの変化を示すが、圧力が高くなるほど膜の硬さは低下し、10.6 - 3.7 GPa の範囲で変化した。単純に膜の緻密さは DLC 表面にエネルギーを与えるイオンフラックス( $n_i$ )と膜の成長に寄与する中性ラジカルフラックス( $n_n$ )との比率に依存することが考えられるため、次のような検討を行った。

DLC 膜の膜硬度と  $n_n$ 、及び  $n_i$  との関係調べのために、フラックス比  $n_n/n_i$  を次式のように計算した。

$$\frac{n_n}{n_i} = k \frac{n_n}{n_e T_e} = k' \frac{n_n}{n_e T_e} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $n_n$  は中性粒子密度であり、カーボンの DC マグネトロンプラズマにおけるイオン化率は低いいため、成膜速度に比例すると考えられる。 $k$  及び  $k'$  は比例定数である。 $n_e$  と  $T_e$  は電子密度と電子温度を表しており、ラングミュアプローブ計測結果の値を用いることができる。

式(2)を計算したところ、フラックス比は印加電力の増加に対して増加する傾向が得られ、圧力の増加に対しても増加する傾向が得られた。圧力が高い条件ではイオンの平均自由行程も短くなることからエネルギーの高いイオンはガラス基板まで届かなくなる。そのため図8での膜硬度の低下を招いていると推測できる。しかしながら、ターゲット印加電力を増加したときには DLC の膜硬度は高くなっているにもかかわらず、 $n_n$  の割合が  $n_i$  よりも高くなっている。この結果は、DLC の緻密さが単純にイオンフラックスとの比で決まっているわけではないことを示唆している。図7から分かるようにこのプラズマ生成条件の領域では G バンドのピーク位置も変化していることから、 $sp^3/sp^2$  比も変化していることが予想され、イオンフラックスから受けるエネルギーが DLC の緻密化に複雑に作用していることが考えられる。今後さらなる調査が必要である。

以上から分かるように、本研究で用いた DC マグネトロンスパッタリング法を用いて 10.6 GPa の硬さの DLC 膜が形成できることが分かった。一般に DLC 膜の分類として言われている膜の硬さは 9 GPa 以上であるとされており<sup>17)</sup>、本研究で得られた絶縁材上に形成された硬質カーボン膜は膜硬度の観点からも DLC 膜であると考えられ、摺動用途での利用も期待ができる。

### 4. 今後の展開

本研究の結果から、大型部品に対して比較的量産性の高いコーティング手法である PVD 法を用いれば、絶縁材料上に



硬度 10.6 GPa (約 1 000 HV) を有する DLC 膜が成膜可能であることが分かった。また、試験的に摺動部で用いられている代表的なプラスチック材料である PA66 (ポリアミド 6,6), PTFE (テフロン), PEEK (ポリエーテルエーテルケトン), PPS (ポリフェニレンサルファイド) に対して実際に成膜を行い、それら樹脂材料の摩耗量を摺動試験により評価したところ、DLC 膜を成膜することにより DLC 膜を成膜しないものに対して摩耗量が 15 - 98 % 減少したという結果も得られている (図 2)。樹脂の種類により耐熱性や耐プラズマ性などに違いがあり、今後 DLC 膜と樹脂との界面の形成方法などの最適化や DLC 膜の詳細な密着性の評価などについても行っていく必要はあるが、実用的な方法で樹脂材料に対して耐摩耗性 DLC コーティングが可能であることを示すことができたことは、樹脂材料の耐久性向上に向けた今後の展開が期待できることを意味する。

## 5. おわりに

本研究では、代表的な PVD 法である DC マグネトロンスパッタリング法を用いて樹脂材料上に耐摩耗 DLC 膜を成膜する技術を開発した。本手法を用いることにより産業機械部品などで用いられる大型で三次元形状の樹脂部材に対して耐摩耗性の優れた DLC 成膜ができるようになる。ラマン分光分析により絶縁性のガラス基板上に DLC 膜が形成できていることを確認し、その硬さは 10.6 GPa であった。また、本技術を実際の樹脂材料に展開して摩耗量が低減する効果も確認した。今後は産業機械部品への適用に向けて、実環境条件に適用可能な樹脂材料への耐摩耗性 DLC コーティング技術を確認し、当社製品の差別化及び高付加価値化に貢献するものと考えられる。

## 参 考 文 献

- 1) 加納：高硬質炭素膜のトライボロジーの研究動向，トライボロジスト，58，8(2013)，p.524
- 2) T. Nakatani, et al. : Application of Diamond-Like-Carbon Coating to a Coronary Artery Drug-Eluting Stent, J. Photopolymer Science and Tech., 20(2007), p.221
- 3) 滝澤：プラズマイオン注入成膜法による耐腐食性及び耐摩耗性に優れた DLC 膜の開発，三井造船技報，214(2015)，p.13
- 4) 滝澤：プラズマイオン注入法によるダイヤモンドライクカーボン薄膜の作製とその評価，プラズマ・核融合学会誌，92，6(2016)，p.460
- 5) 佐藤：エンジン樹脂化 本命のブロックへ，日経 Automotive，2016 年 9 月号，p.60
- 6) T. Nakahigashi, et al. : Properties of flexible DLC film deposited by amplitude-modulated RF P-CVD, Tribology International, 37(2004)，p.907
- 7) 中村．外：DLC コーテッドゴムの金属との摩擦特性，東京都立産業技術研究センター研究報告，第 8 号

(2013)，p.14

- 8) S. Hirota, et al. : Comparison of film property and relative ionization degree in HPPMS, UBMSTM and AIPTM process, 東京都立産業技術研究センター・表面技術協会三部会 公開シンポジウム「ドライプロセスの新潮流」予稿集(2012)，p.52
- 9) P.J. Kelly, et al. : Novel engineering coatings produced by closed-field unbalanced magnetron sputtering, Materials & Design., 17, 4(1997)，p.215
- 10) V.M. Donnelly : Plasma electron temperature and electron energy distributions measured by trace rare gases optical emission spectroscopy, J. Phys. D: Appl. Phys., 37, 19(2004) p.R217
- 11) C. Zhiying, et al. : Measurement of electron temperatures and electron energy distribution functions in dual frequency capacitively coupled CF<sub>4</sub>/O<sub>2</sub> plasmas using trace rare gases optical emission spectroscopy, J. Vac. Sci. Technol. A, 27, 5(2009)，p.1159
- 12) K. Takizawa, et al. : The Relationship Between Characteristics of DLC Film and Electron Temperature Measured by Optical Emission Spectroscopy, IEEE Trans. Plasma Sci. 44, 12(2016)，p.3207
- 13) J. Robertson : Diamond-like amorphous carbon, Mater. Sci. Eng., 37, nos. 4-6(2002)，p.129
- 14) L.G. Cancado, et al. : Stokes and anti-Stokes double resonance Raman scattering in two-dimensional graphite, Phys. Rev. B, 66(2002) p.035415
- 15) 滝川：フィルタードアーク蒸着により DLC を創る，プラズマ・核融合学会誌，92，6(2016)，p.466
- 16) 三浦：全国公設試験研究機関による中小企業技術支援を念頭に置いた DLC ラウンドロビンテストの試み，プラズマ・核融合学会誌，92，6(2016)，p.472
- 17) 大竹．外：DLC コーティングの動向と国際規格化，トライボロジー会議予稿集，2014 年春(2014) p.F23

## [ 問い合わせ先 ]

技術開発本部 技術開発センター  
TEL 0863 - 23 - 3001 小西 益生



滝澤 一樹



石原 修二



國次 真輔

## 桜島港フェリー施設の大規模改修(第1期) - 桜島港施設整備工事(その1) -



写真1 フェリー施設着手前の全景



写真2 フェリー施設(第1期)完成の全景

桜島港フェリー施設は、桜島と鹿児島市の中心市街地に位置する鹿児島港を結ぶフェリー発着用施設である。本航路は5隻のフェリーで1日約70航路(139便)を24時間運航しており、年間乗客520万人、航送車両約153万台と世界屈指の輸送量を誇っている。

本工事は、桜島港のフェリー施設等の全体的な老朽化や船舶の大型化により運航の支障をきたしていることから、新規第4バースへの車両乗降設備及び新規アクセス橋(人道橋)の製作・架設を行う第1期工事である。又、現在メインで使用している第2,3バースの全面改修工事が第2期工事として予定されている先行工事なども実施した。

### 特長

本工事の主な特長を以下に示す。

#### (1)基礎杭の工法

基礎杭はボーリング調査を行った結果、溶岩層(大正溶岩)が広範囲に厚く覆っていたため、場所打ちコンクリート杭オールケーシング工法とした。しかし、コンクリート打設の際に溶岩層の隙間からコンクリートが流出する恐れがあったため、レゾフォンピア工法(鉄筋かごにレゾフォンネットの取付)を併用してコンクリート流出防止対策を講じた。

#### (2)起重機船を使用しての人道橋一括架設

フェリー施設の場内は狭隘な場所であり、陸上の作業スペースが確保できなかったため、主桁部材等を工場にて各径間毎に地組立(5ブロック)を行い、台船で海上輸送にて現場搬入した桁を300t吊の起重機船を使用し架設を行った。

#### (3)フェリーの24時間運航に対する配慮

本工事では、既設桁の撤去作業は25t吊ラフテレーンクレーンを使用して行う計画であった。しかし、日中のフェリー運航は15分間隔であり車両乗降が頻繁であっ

たため、フェリー運航が60分間隔になる時間帯(23:00~翌05:00)の夜間に550t吊トラッククレーンを使用し一括撤去を行うことでフェリー運航及び車両の乗降に対して規制することなく施工を行った。

### 主要目

工事名: 桜島港施設整備工事(その1)

工事場所: 鹿児島市桜島横山町

発注者: 鹿児島市船舶局

請負者: 三井・南生特定建設工事共同企業体

工期: 自)平成27年4月23日~至)平成29年3月17日

### 第4バース

型式: 非合成連続鋼桁

鋼重: 335.3t

人道橋: L=86.4m

車道橋: L=51.2m

可動橋: L=21.8m(人道橋)

: L=25.6m(車道橋上段)・L=25.1m(車道橋下段)

進入路: L=32.8m(L型擁壁)

機械・電気設備: 1式(油圧シリンダー・電動シリンダー等)

### 第2,3バース向け先行工事

人道橋: L=10.0m

進入路: L=29.5m(U型擁壁)

仮設工: 1式(仮設車道橋・人道橋)

(三井造船鉄構エンジニアリング株式会社)

[問い合わせ先]

沿岸事業部 玉野工場 工務部

TEL 0863-83-9800 島村 隆司

働き方改革への対応を支援する“TIME-3X”の販売を開始  
- 強くて優しい会社づくり、はじまります。 -



図1 一新したインターフェイス「マイページ」



図2 マルチデバイスに対応したアクセス環境

三井造船の100%出資子会社である三井造船システム技研株式会社は、労務管理システム“TIME-3(タイムスリー)”のシリーズ10世代目となる最新版“TIME-3 X(タイムスリーテン)”の販売を開始する。TIME-3シリーズは、船舶の艦装工事において、船内作業者のチェックインシステムとして1974年に誕生した。近年TIME-3シリーズが大切にしているのは、「働く人」と「雇用する人」に、労働時間管理や健康管理の面から小さな変化をもたらすこと。その小さな変化はやがて生活の中でゆとりを作り、他者を気にかける余裕が生まれ、チームや事業所の生産性向上へと繋がり、さらには企業の競争力向上のきっかけになると考えている。

TIME-3Xは、40年以上時間管理の分野で積み上げてきた業務ノウハウと、最新の設計思想で開発を行っている。さらに、多くのお客様からの要望を聴取し、機能の拡張、そして運用手順を想定した業務フローの検討を行い、“本当に使える最適なカタチ”をお客様へ提供している。働き方改革が求められる現代、強くて優しい会社づくりのお手伝いとして、当社は“TIME-3X”を提案する。

**特長**

- (1) 気づきを与えるマイページを配置  
新たに用意したマイページは、毎日の勤務状況はもちろん、休暇の取得状況・申請の承認状況、メンタルヘルスや産業医のアドバイスなどをコンパクトにまとめ、社員と上司へ共に気づきを与えるよう設計。
- (2) マルチデバイス/マルチブラウザ対応  
レスポンシブWebデザインを採用し、利用者のデバイスにあわせてシステムが表示を最適化。PCなど大画面での一覧性、スマホ利用時の縦スクロール対応双方に対応し、利便性を向上。
- (3) 客観的な記録に基づいた「適正な」労働時間管理  
ニーズの高いカードリーダーとの連携はもちろん、Web打刻や入退場記録など様々なデータを連携可能。更に客観的記録と勤務時間の乖離理由の管理にも対応。コンプ

- ライアンスの取り組みをサポート。
- (4) 負荷バランスを整え長時間労働を抑制  
グループ内の負荷バランスの確認・比較が簡単に行えるよう設計された画面を用意。作業負荷の平準化を効果的に実施。
- (5) WEB問診チェックで従業員の健康をサポート  
同社製品の健康経営支援サービス「Dr. SELF CHECK For Web」と連携することで、従業員の勤務状況と健康状態のバランスを把握し、企業の健康管理に関するリスクを軽減、健康経営を支援。

**主要目**

オペレーティングシステム: Windows Server 又は CentOS  
アプリケーションサーバ: Apache Tomcat, IBM Web Sphere  
又は Oracle WebLogic

データベースサーバ: Oracle, SQL Server, PostgreSQL

**フレームワーク**

- ・ Spring Framework/MVC
- ・ Thymeleaf( responsible design ), My Batis

**オプション**

- ・ TIME-3X / WL( 工数管理 )
- ・ TIME-3X / MH( ManHour , 人時生産性管理 )
- ・ TIME-3X - EI( 人事関連の身上情報変更 )

**関連製品**

- ・ 健康経営支援サービス「Dr. SELF CHECK For Web」
- ・ IC/ 磁気カードリーダー「MiEVAH7700」

記載した会社名、製品名は、各社の商標又は登録商標です。

(三井造船システム技研株式会社)

[問い合わせ先]

ビジネス事業本部 営業統括部  
パッケージソリューション営業グループ  
TEL 043 - 274 - 6166 植島 尚樹



## 三井造船技報編集委員会

委員長 木戸口 晃  
委員 高岡 正 宏  
神 永 肇  
難 波 浩 一  
杉 山 洋 一  
穴 倉 進  
村 田 和 俊  
兼 本 浩

## 三 井 造 船 技 報

第 219 号

2017 年(平成 29 年)7 月 31 日発行

発行人 西 畑 彰  
発行所 三井造船株式会社 技術開発本部  
〒104 - 8439 東京都中央区築地 5 丁目 6 番 4 号  
TEL 03 - 3544 - 3266  
<http://www.mes.co.jp>  
印 刷 株式会社 MES ファシリティーズ  
〒261 - 7128 千葉県千葉市美浜区中瀬 2 - 6 - 1

三井造船技報に関するお問い合わせは、e-mail : [gihojim@mes.co.jp](mailto:gihojim@mes.co.jp) まで。

万一、落丁・乱丁がありました節は、お取り替えします。

(非売品、無断転載を禁ず)

## 三井造船株式会社

<http://www.mes.co.jp/>

本社	〒104-8439	東京都中央区築地5丁目6番4号	TEL 03-3544-3147
幕張センター	〒261-7128	千葉県千葉市美浜区中瀬2丁目6番1	TEL 043-351-8000
北海道支社	〒060-0807	札幌市北区北七条西4丁目5番地1(伊藤110ビル)	TEL 011-736-0036
東北支社	〒980-0811	仙台市青葉区一番町2丁目7番17号(朝日生命仙台一番町ビル)	TEL 022-262-3481
中部支社	〒460-0008	名古屋市中区栄2丁目10番19号	TEL 052-218-3071
関西支社	〒550-0004	大阪市西区靱本町1丁目11番7号(信濃橋三井ビル)	TEL 06-6447-2001
中国支社	〒730-0051	広島市中区大手町2丁目7番10号(広島三井ビル)	TEL 082-248-0311
呉営業所	〒737-0045	広島県呉市本通3丁目5番18号(メゾンロイヤル)	TEL 0823-25-7837
九州支社	〒812-0036	福岡市博多区上呉服町10番1号(博多三井ビルディング)	TEL 092-291-0092
東九州支店	〒870-0027	大分県大分市末広町1丁目1番18号(ニッセイ大分駅前ビル)	TEL 097-537-9260
沖縄支店	〒900-0033	沖縄県那覇市久米2丁目4番16号(三井生命那覇ビル)	TEL 098-869-3135
玉野事業所	〒706-8651	岡山県玉野市玉3丁目1番1号	TEL 0863-23-2010
千葉事業所	〒290-8531	千葉県市原市八幡海岸通1番地	TEL 0436-41-1112
大分事業所	〒870-0395	大分県大分市日吉原3番地	TEL 097-593-3111
技術開発本部			
技術開発センター	〒706-0014	岡山県玉野市玉原3丁目16番1号	TEL 0863-23-3001
昭島研究センター	〒196-0012	東京都昭島市つつじが丘1丁目1番50号	TEL 042-545-3111
海外事務所	釜山, 北京, ハノイ, ジャカルタ		
海外現地法人	三井造船ヨーロッパ株式会社(ロンドン)		
	三井造船(中国)投資有限公司(上海)		
	MES タイ(バンコク)		
	三井造船アジア株式会社(シンガポール)		

# 三井造船技報 第 219 号の発行に当たって

「三井造船技報」をご高覧いただき、ありがとうございます。

本誌は、当社が平素ご指導いただいている方々へ、最近の当社の新製品や、それを支える技術についてご紹介するものです。本誌の内容につきましては、更に充実を図る所存ですので、忌憚のない御意見を賜りましたら、大変幸甚です。

送付先の貴組織名、ご担当部署、所在地などにつきましては正確を期しておりますが、変更などがございましたら、以下にご記入の上、FAX または e-mail でお知らせ頂きたいお願い申し上げます。

敬具

キ リ ト リ 線

FAX : 03 - 3544 - 3086

e-mail : gihojim@mes.co.jp

三井造船株式会社 技報編集委員会 事務局 行( TEL. 03 - 3544 - 3266 )

## 三井造船技報 送付先の確認と第 219 号へのご意見等について

1. 送 付 先 : 従来通り 変更 削除 (いずれかに V を付けてください)

a) 旧送付先

所在地 〒 \_\_\_\_\_

組織名称 \_\_\_\_\_

担当部署 \_\_\_\_\_

旧送付先は、現在の宛先ラベルのコピーをここに貼付して  
頂いても構いません。

b) 新送付先

所在地 〒 \_\_\_\_\_

組織名称 \_\_\_\_\_

担当部署 \_\_\_\_\_

ご担当者 \_\_\_\_\_

TEL No. \_\_\_\_\_

FAX No. \_\_\_\_\_

2. 今後の編集に反映させていただくため、下記アンケートにご協力をお願いします。

( 1 ) 本号で興味があった記事をお知らせください。(最初のページ No. で可。複数回答可)

技術論文・報告では .....

製品・技術ニュースでは .....

その他の記事では .....

( 2 ) その他、ご意見・ご要望あれば、お聞かせください。

キ  
リ  
ト  
リ  
線



# 主要営業品目

## 船舶・艦艇事業本部 TEL 03-3544-3318 FAX 03-3544-3031

液化天然ガス（LNG）運搬船，液化石油ガス（LPG）運搬船，原油輸送船，石油精製品運搬船，ばら積貨物船，オープンハッチ型貨物船，鉾石運搬船，石炭運搬船，コンテナ船，自動車運搬船，冷凍運搬船，ガス燃料船，LNG バンカー船，FSO，FPSO，FSRU，超高速貨物船，超高速カーフェリー，各種特殊船

修繕船，各種改造船工事，M & R エンジニアリング

護衛艦（DD），潜水艦救難母艦（AS），潜水艦救難艦（ASR），音響測定艦（AOS），輸送艦（LST），補給艦（AOE），掃海母艦（MST），海洋観測艦（AGS），巡視船，練習船，海洋気象観測船，漁業調査船，漁業取締船，海洋調査船，研究調査船，物理探査船，環境整備船，視察船，測量船，交通艇，消防艇，高速旅客船，深海探査ロボット（AUV，ROV），小型水中ロボット，水道管点検ロボット

自動艦位保持装置（DPS），システム操船装置，艦橋情報表示装置（ABS / IBS），舵減揺装置，船体運動状態表示装置（SMACS），航海情報表示装置，フィンスタビライザー，中折式デッキクレーン，赤外線低減装置，弾薬搭載機材，補機制御表示装置，機関操縦装置，水中放射雑音シミュレータ，防火防水実習場，各種訓練水槽，操船シミュレータ，船舶運航支援のポータルサービス，フリートモニタ，洋上風力用浮体基礎

## 機械・システム事業本部 TEL 03-3544-3950 FAX 03-3544-3055

船用ディーゼル機関

往復動圧縮機，バイナリー発電設備，蒸気タービン，炉頂圧回収タービン，軸流・遠心式圧縮機，ガスタービン，ガスエンジン

鍛造前誘導加熱装置（ピレットヒータ，バーヒータ，ピンヒータ 他），鉄鋼・非鉄分野向誘導加熱装置（薄板加熱装置，銅管焼鈍装置，線材加熱装置），高周波電源装置（PWM インバータ，サイリスタインバータ，トランジスタインバータ，ゾーンコントロール用電源）

遠隔操作マニピュレータおよびその周辺機器，センシング機器（地中埋設物・建築物探査レーダ，複合材剥離検査器），レーダ探査サービス，水理実験設備，塔，槽，熱交換器，回転式乾燥機

岸壁用コンテナクレーン，ヤード用コンテナクレーン，船用ガントリークレーン，ローダー，アンローダー（連続式，グラブバケット式），ジブクレーン，天井クレーン，コンテナターミナルマネジメントシステム

橋梁，ハイブリッド構造物（浮防波堤，浮消波堤，浮棧橋，浮体式係船岸，ケーソン），海洋構造物（シーパース，ケーソン，沈埋函，ジャケッット），浮体式海洋設備

LSS（ライフサイクルソリューションサービス：上記設備・機器の保守，改造用部品・機器の供給，性能改善・改造工事・延命工事などのエンジニアリング・サービスと施工），IT を活用した各種設備・機器のリモートモニタリングサービス・診断サービス・情報サービス，各種設備・機器の包括／一括メンテナンスサービス，各種技術サービス（運転及びメンテナンスにかかわる技術指導・工事指導・工事施工）

## エンジニアリング事業本部 TEL 043-351-8000 FAX 043-351-8111

プラントのエンジニアリング及び建設工事（石油化学，化学繊維，合成樹脂，石油精製，ガス製造・精製，無機化学，化学肥料，ファインケミカル，代替エネルギー関連），プラント要素技術（加熱炉，分解炉，分解ガスクエンチャー，高粘度流体脱揮装置），エンジニアリング支援システム，フィージビリティスタディ，プラントメンテナンス，SDM 工事

海外土木・建築工事全般，特殊構造物，風力発電設備工事

ディーゼルエンジン発電設備，バイオマス発電設備，各種コージェネレーションプラント

三井リサイクリング 21（キルン式ガス化溶解システム），廃棄物処理関連（流動床式焼却炉，粗大ごみ処理施設，リサイクルセンター，加熱脱塩素化装置，ダイオキシン分解触媒，炭化炉，PCB 処理），ガス処理関連（脱塩，集塵）

水処理関連（産業排水，汚泥），ガス処理関連（排煙脱硫，排煙脱硝，脱臭），廃棄物再資源化システム（焼酎廃液，有機性廃棄物からのメタン発酵，コンポスト及び乾燥装置），バイオガスプラント（生ごみ・汚泥バイオガスプラント，油温減圧乾燥式食品廃棄物再資源化システム，家畜糞尿再資源化システム）

**100**<sup>th</sup>  
*Anniversary*

