

三井 造船 技報

平成 28 年 9 月 ■ 第 217 号

MITSUI ZOSEN TECHNICAL REVIEW No. 217 2016





表紙説明

ME-LGI エンジンの性能試験

ディーゼルエンジンは、組み立てラインの最終段階で、試運転を行い、性能試験に合格したものを出荷する。エンジン出力や排気ガス分析のほかにも多数の社内検査を行う。電子制御式リキッドガスインジェクションディーゼルエンジン（ME-LGI）は、従来の燃料油と代替燃料のメタノールが使用可能な二元燃料エンジンであるので、それぞれの燃料を用いた試験を実施した。

試験中はエンジンのさまざまな場所にアクセスする必要があるため、エンジンの周囲は仮設足場で囲まれている。

- ①ディーゼル組立・試運転工場
- ②試運転状況
- ③ME-LGI

Cover

Trial Test of ME-LGI Engine

The diesel engine, at the last stage of assemble line, will have an operation trial test and will be shipped after successful trial result. Not only engine power and exhaust gas but also many criteria of Mitsui Engineering & Shipbuilding Co., Ltd. (MES) standards shall be tested. As the electric controlled liquid gas injection engine (ME-LGI) is of a dual fuel engine, both conventional fuel oil and methanol as commutable fuel are used for the trial.

Because there are many points to be accessed during the trial, the engine is wholly covered by temporarily stages.

- ① Diesel engine assemble line and trial test shop
- ② Trial test for ME-LGE engine
- ③ ME-LGI engine

MITSUI ZOSEN TECHNICAL REVIEW

No. 217 September 2016

CONTENTS

Technical Paper and Report

Latest Development of Lean Burn Engine MD36G - More than 50 % of Electric Efficiency achieved by Advanced Engine and Heat Recovery Technologies -	1
<i>Kento MAYUZUMI, Morio KONDO, Toshiro OKA, Nobuyuki SAKAIRI, Hisako KATO</i>	
Development of High Pressure Gas Compressor for Fuel Gas Supply System	9
<i>Yutaro WADA, Kosuke MATSUMARU, Shunki YAGI, Kouichi NAMBA, Hironori HAYASHI, Teppei KAJITANI</i>	
Influence of High Concentrated Sodium Chloride on Self-Preservation of Methane Hydrate Mass	16
<i>Hiroko MIMACHI, Tetsuro MURAYAMA</i>	
Development of Coastal Wave Power Generation Device (Part2) - First Report of Demonstration Test at Oarai Port -	22
<i>Kunio NAKANO, Toshihiko MAEMURA, Shogo MIYAJIMA, Takashi KAWAGUCHI</i>	

Technology Explanation

Design & Construction Technology of Foundation for Large Wind Turbine Tower	29
<i>Yoichi MINAMI</i>	

Products and Technology News	32, 33, 34
------------------------------------	------------

中速リーンバーンガスエンジン MD36G シリーズの開発

- エンジン改良と廃熱利用で発電効率 50 % 超を達成 -

黨 健斗* 近藤 守男* 岡 俊郎*
坂入 信之** 加藤 寿子**

Latest Development of Lean Burn Engine MD36G - More than 50 % of Electric Efficiency achieved by Advanced Engine and Heat Recovery Technologies -

Kento MAYUZUMI, Morio KONDO, Toshiro OKA, Nobuyuki SAKAIRI, Hisako KATO

Mitsui Engineering & Shipbuilding Co., Ltd. and DAIHATSU DIESEL MFG. CO., LTD jointly developed a large medium speed lean burn gas engine MD36G put it in the market in 2008. It has undergone continuous study and research to improve its generating efficiency. Recently, it was confirmed at the 6MD36G test engine, the generating efficiency has been improved about 6 % by the design changes of some combustion chamber components and a new combustion method of premixed gas. Moreover, by addition of THS (Turbo Hydraulic System) and VPC (Variable Phase Cycle) systems—waste heat recovery technologies—to the 6MD36G, generating efficiency of the gas engine system has been improved about 12 % from its conventional type. In addition, by THS assist to Turbo Charger rotation shaft, load up speed of 6MD36G has become more than twice as fast as that of the conventional type.

三井造船は、ダイハツディーゼル株式会社と共同開発した中速リーンバーンガスエンジン MD36G を 2008 年に市場投入しており、環境負荷低減や燃料コスト削減の必要性から、更なる発電効率の向上に取り組んでいる。今回新たに改良した燃焼室部品及び新たな燃焼方式の採用により、6MD36G 開発用ガスエンジンにおいて約 6 % の発電効率向上を確認した。さらに、廃熱回収技術である THS (Turbo Hydraulic System) 及び VPC (Variable Phase Cycle) をシステムへ付加することにより、システム全体の発電効率が従来よりも約 12 % 向上した。加えて THS の過給機アシスト機能により、ガスエンジンの負荷上昇速度は従来の 2 倍以上に改善された。

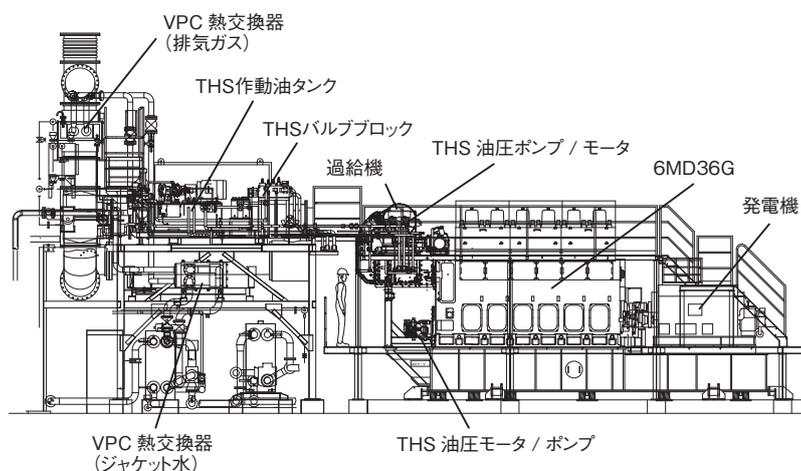


図 1 総合評価試験装置配置図
Layout of Equipment at Integration Test

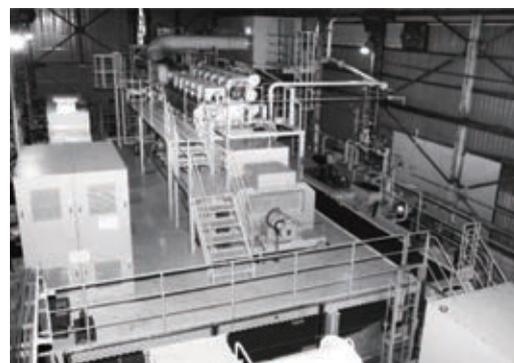


写真 1 6MD36G 開発用設備
6MD36G Field Test Engine

* 機械・システム事業本部 機械工場 技術開発部

** 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

1.1 開発の概要

ガスエンジンは、10 MW 未満の出力範囲において工場や病院などの自家発電用途に適しており、その出力範囲における発電効率は、ガスタービンなど他の原動機よりも優れている。近年のガスエンジン市場では、発電効率が49.5%にまで達する機種も出てきている¹⁾。三井造船はダイハツディーゼル株式会社と共同開発した中速リーンバーンガスエンジンMD36Gを2008年に市場投入しているが²⁾³⁾、当社においても環境負荷低減や燃料コスト削減の必要性から、ガスエンジンの更なる発電効率の向上が求められている。また、ガスエンジンの負荷追従性を向上させることで、太陽光発電や風力発電などの自然エネルギー発電設備における供給電力の変動を緩和し、補完することが期待されている。

当社では継続的にMD36Gの開発を行っており、今回新たに開発・適用した技術により、ガスエンジンMD36G発電システムの発電効率及び負荷追従性の向上を実現した。発電効率向上のために、燃焼室部品を改良し、新たな燃焼方式(パイロット油分割噴射)を採用した。さらに、廃熱回収技術であるTHS(Turbo Hydraulic System)とVPC(Variable Phase Cycle)をシステムへ付加することにより発電効率を一層向上させるとともに、THSの採用により、低出力状態から最大出力までの到達時間を半分以下に短縮させることができた。

1.2 リーンバーンガスエンジンMD36Gの特長

MD36Gシリーズの商用機(以下、MD36Gと称す)は、2760kWから5300kWまでの出力を6から12シリンダでカバーしている。図2に示すように、MD36Gはダイハツディーゼルのベストセラーである中速ディーゼルエンジンDK-36をベースとして、燃料ガスの供給システムを付加することによりガスエンジンに転換されており、給気管へ燃料ガスを噴射するためのガス弁とシリンダヘッドの中心に燃料ガスと

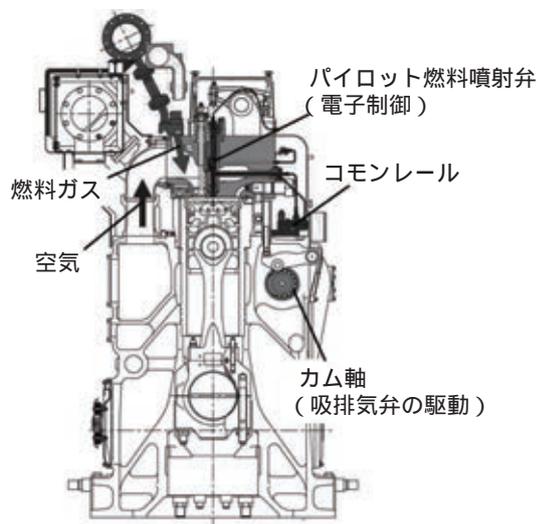


図2 MD36G断面図
Cross-section of MD36G

空気の予混合ガスを着火するためのパイロット燃料噴射弁を備えている。

図3に示すように、MD36Gは筒内へ導入された予混合ガスをパイロット燃料弁から少量噴射されたパイロット油(軽油)によって着火させる筒内直噴マイクロパイロット油着火方式を採用している。この方式は、軽油のみを使用するディーゼルモードでエンジンの起動が可能である。さらに、パイロット燃料弁は、火花点火方式に用いられるスパークプラグよりも寿命が長く信頼性が高いという特長も有している。また、100%負荷時のパイロット油噴射量はガス燃料も含めた熱量に対しおよそ1%程度と微量である。

1.3 開発用設備(所内発電所6MD36Gと単気筒試験機)

写真1は、当社玉野事業所の発電設備としても稼働している6MD36Gガスエンジンの開発用設備(以下、6MD36Gと称す)である。定格出力は2760kWで、燃料には天然ガスを用いている。本設備は当事業所内の電力系統と連携されており、電力需要が高まる日中におよそ10時間のDSS(Daily Start and Stop)運転を行っている。2006年に稼働を開始してから総運転時間は2016年4月の時点で22000時間を越えている。さらに、当事業所内に基礎的な試験を行うための単気筒試験機を有している。今回新たに開発・適用した技術は、燃焼特性などの一次評価を当事業所内に保有する単気筒試験機で行った後、THS、VPCも加えた総合評価試験を6MD36Gで実施した。発電設備の全体配置を図1に示す。

2. MD36Gへの新規適用技術

MD36Gの発電効率を向上させるため、燃焼室部品を改良し、予混合ガスの圧縮工程でパイロット油を2回噴射させる新たな燃焼方式(パイロット油分割噴射)を採用した。

2.1 燃焼室部品の改良

2.1.1 クレビスボリュームの削減

MD36Gの燃焼室内には、クレビスボリュームと呼ばれる燃焼に寄与しない容積が存在している。図4に斜線で示したトップリング上部のピストンクラウンとライナー壁の間に形成されるわずかな空間はクレビスボリュームであり、この空間の入口で燃焼火炎が冷却され消炎するため、ここに侵入した予混合ガスには筒内の火炎が到達しない。その結果、この中の予混合ガスは燃焼行程の間に燃えず、大部分がそのまま排気行程で燃焼室から排出される。したがって、クレビスボリュームは極力削減することが望ましい。今回の新たな設



図3 筒内直噴マイクロパイロット油着火方式
Micro-pilot Direct Injection & Ignition Method

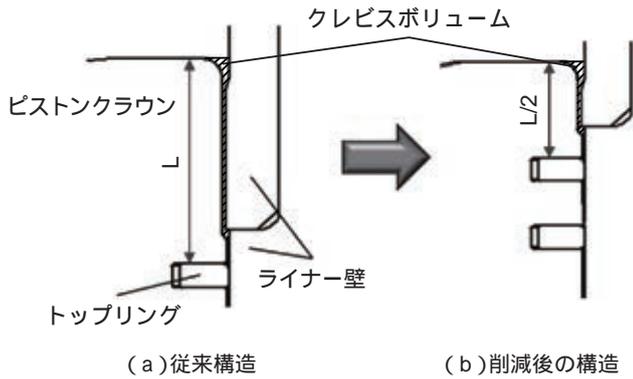


図4 クレビスボリュームの削減
Reduction of Crevice Volume

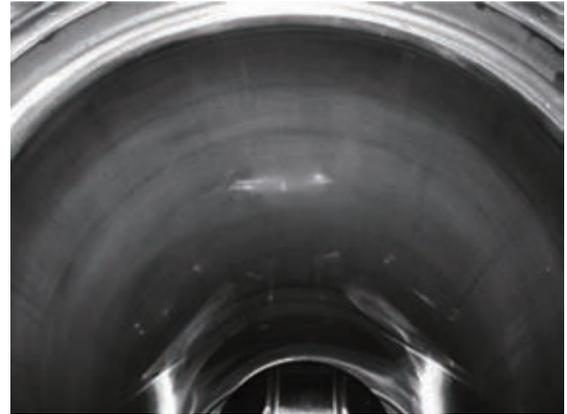


写真3 シリンダーライナー内面
Inside of Cylinder Liner

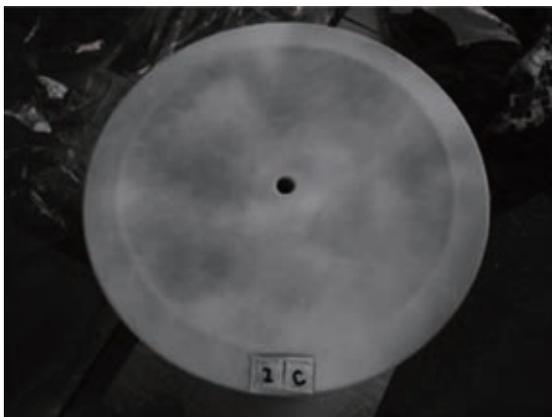


写真2 液体浸透探傷試験時のピストンクラウン
Piston Crown at Liquid Penetration Test

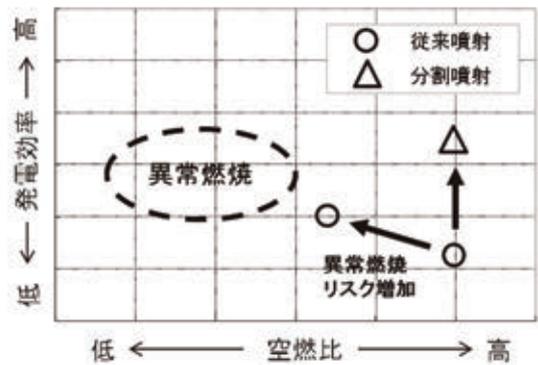


図5 空燃比と発電効率及び異常燃焼リスクの相関
Correlation between Air/Fuel ratio, Power Generation Efficiency and Abnormal Combustion Risks

計では、図4に示すようにトップリングからピストン頂部までの距離(L)を従来の半分とすることによりクレビスボリュームを削減した。

2.1.2 ピストンリング本数の削減

1.2で述べた通りMD36Gはディーゼルエンジンからガスエンジンへ転換されたが、開発当初からピストンリングの本数は変更されていなかった。しかし、ガスエンジンに用いる燃料の特性はディーゼルエンジンの燃料(C重油などの低質燃料)と比べ良好であるため、燃焼室内部へのデポジット(カーボンなどの付着)が少なく、ピストンリングの劣化は少ないと考えられる。2006年から稼働している6MD36Gの開放点検においてもピストンリングの状態が良好であることを確認したため、今回の設計では、圧縮リングの本数を従来の3本から2本に減らし、ピストンが摺動する際の機械摩擦抵抗の低減を図った。

2.1.3 機械的信頼性の確認

前項までに示した燃焼室部品の二つの改良点を単気筒試験機に適用し、正常に運転できることや、燃焼室各部の温度が設計範囲内であることを確認した。その後、6MD36Gへこれら改良策を展開し、4000時間以上の運転を行った。開放点検の結果は写真2と3に示したとおりであり、燃焼室内部に異常は観察されなかった。また、ピストンリングから燃

焼ガスの吹き抜けなどは無く、燃焼室部品の状態も良好であることを確認した。

2.2 新たな燃焼方式(パイロット油分割噴射)の採用

2.2.1 異常燃焼の回避及び発電効率の改善

発電効率を向上させるために、例えば図5に示すようにガスエンジンへの給気量を従来よりも減少させて予混合ガスの燃料ガス濃度を濃くする(すなわち空気過剰率をより1に近づける)と、運転負荷が高い場合に急激な熱発生による異常燃焼やノッキングのリスクを高めることにつながる。異常燃焼やノッキングは、エンジン部品の損傷を招くため回避しなければならない。1.2で述べたとおりMD36Gは筒内直噴マイクロパイロット油着火方式を採用しており、パイロット油の噴射時期及び噴射量は電子制御によりコントロールされている。従来の方式では予混合ガスを着火させるためにパイロット油をピストンの上死点の手前で一度だけ噴射(メイン噴射)していたが、新たに開発した方式ではこのパイロット油を2回に分けて噴射することとした。これは、1回目の噴射(プレ噴射)をピストンの下死点近傍で行い、2回目の噴射(メイン噴射)をピストンの上死点の手前で行うものである。

この着火方式により、図5に示すように空燃比を一定に保ちながら異常燃焼のリスクを回避するとともに発電効率を

改善できることを6MD36Gにて確認した。このとき、100%負荷におけるパイロット油の噴射量は、ガス燃料も含めた熱量換算で、従来の1.0%に対し、分割噴射では1.4%と微増にとどまった。

2.2.2 燃焼プロセス及びメカニズム

図6に分割噴射の燃焼プロセスを従来噴射と比較して示す。筒内に予混合ガスが充填され吸気弁が閉じた後、ピストンが下死点から圧縮行程に入る付近において、パイロット油がプレ噴射される。プレ噴射されたパイロット油は筒内の外側へ向かって拡散していく。この時点ではピストンの圧縮が不十分のためパイロット油は着火せず予混合ガスの燃焼は始まらない。その後、圧縮行程の上死点付近で、今度はパイロット油のメイン噴射によって予混合ガスが着火し、筒内の中心付近から火炎伝播が始まるが、その火炎伝播が、プレ噴射に

より筒内の外側付近まで拡散したパイロット油の燃焼によりアシストされる。図7にクランクアングルと筒内圧及び熱発生率の関係を示す。これらは、単気筒試験機で得られた結果であり、従来噴射(メイン噴射のみ)を破線で、分割噴射(プレ噴射+メイン噴射)を実線で示している。図7(a)より、予混合ガスの着火時期(熱発生の開始時期)はクランクアングルの基準点である上死点から-12度位置で同一であることが分かる。これは従来噴射と分割噴射ともにメイン噴射の噴射時期を同一にしているためであり、分割噴射においても予混合ガスの着火時期がメイン噴射により適切に制御されることを示している。燃焼が開始した後、分割噴射の熱発生率は、上死点付近から上死点後15度の間で従来噴射を上回り、その結果、図7(b)に示したとおり筒内最高圧力も高くなっている。このことは予混合ガスの火炎伝播がプレ噴射によるパ

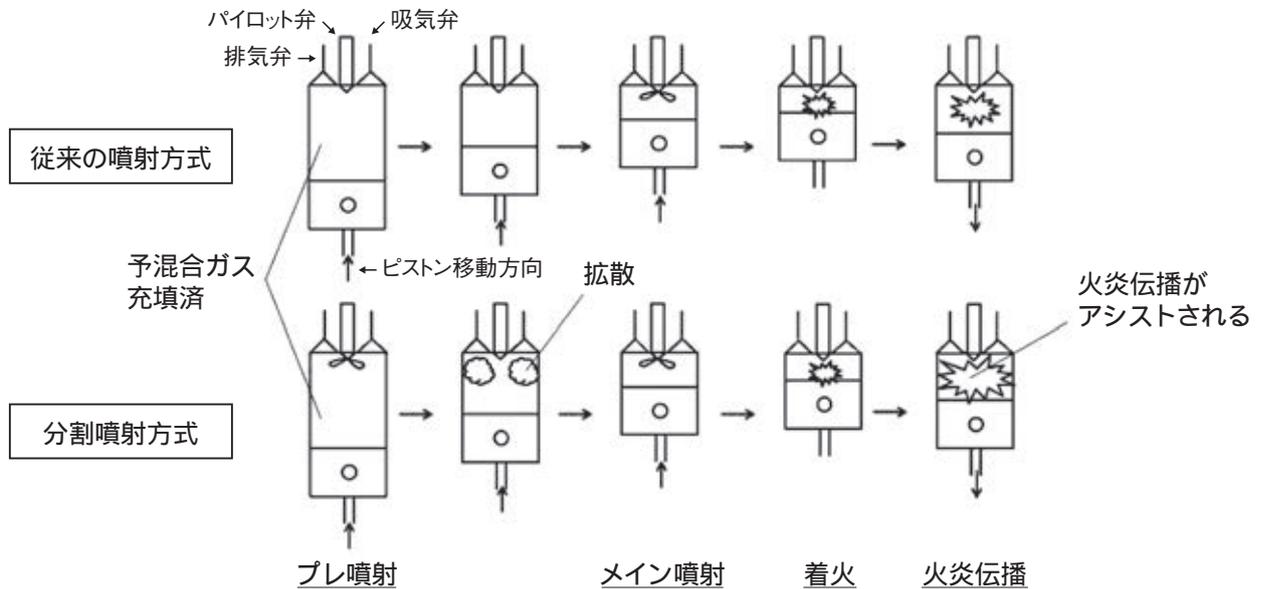
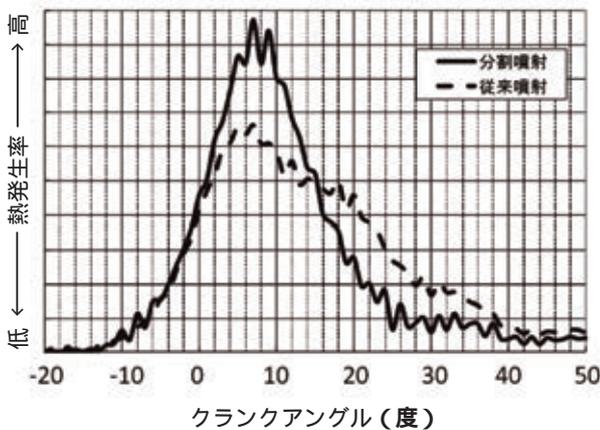
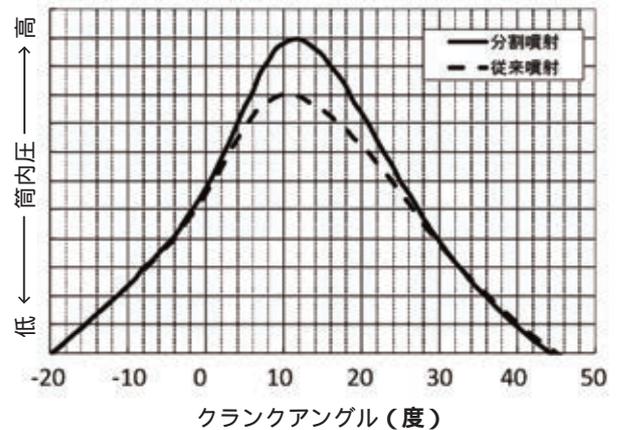


図6 従来噴射と分割噴射の燃焼プロセス図
Images of Combustion Processes in Conventional Injection and Separate Injection of Pilot Oil



(a)熱発生率



(b)筒内圧

図7 噴射方式の違いによる筒内圧力と熱発生率の上死点を基準とするクランクアングルとの関係
Cylinder Pressure and Heat Release Rate depend on Pilot Oil Injection Types

イロット油の燃焼によってアシストされたことを示し、これによりガスエンジンの発電効率が改善された。

前述のとおり、分割噴射において最も重要なことは、予混合ガスの火炎伝播をアシストすると同時に、異常燃焼のリスクを回避することである。このためには、予混合ガスの着火時期はパイロット油のメイン噴射によって制御されなければならない。プレ噴射を下死点(上死点前 180 度)付近で行うが、その理由として、(A)下死点付近ではピストンによる圧縮力が弱いため、プレ噴射したパイロット油が着火しないこと、(B)メイン噴射により予混合ガスが着火されるタイミング(上死点付近)までに、プレ噴射したパイロット油が筒内の外側まで到達する時間が十分にあること、(C)その間にプレ噴射したパイロット油が燃焼室内に拡散して希薄となるため、ピストンにより圧縮されてもそれ自身が着火源にならないことが挙げられる。(B)は予混合ガス中にプレ噴射されたパイロット油が筒内の外側まで十分に拡散するため、この領域の燃焼をアシストすることになり、発電効率向上に寄与していると考えられる。また、(A)及び(C)は、プレ噴射したパイロット油による予混合ガスの燃焼開始を抑止し、過早着火による異常燃焼のリスク回避に有効と考えられる。以上を満足するプレ噴射の噴射量及び噴射時期は、ガスエンジンの仕様や運転条件によって、事前に検証して決定しておくべきパラメータである。

2.2.3 NOx 排出量増加の抑制及び燃焼サイクル変動の抑制

パイロット油分割噴射によるその他の効果として、NOx 排出量増加の抑制及び燃焼サイクル変動の抑制が挙げられる。一般的に、燃焼促進による発電効率の改善に伴い、NOx 排出量が増加することは避けられないが、プレ噴射により噴射されたパイロット油は燃焼時まで十分に拡散して希薄燃焼となるため、発電効率を改善しながらも NOx 排出量の増加を抑えることができる。さらに、プレ噴射のパイロット油により予混合ガスの火炎伝播がアシストされることで、サイクル変動の原因となる緩慢な燃焼サイクルの割合が減少する。これにより出力のサイクル変動が減少し、ガスエンジンの運転安定性向上が期待できる。

3. 廃熱回収技術の適用

当社はエンジンの廃熱を回収して再利用する THS 及び VPC を開発している。この技術を MD36G に適用することで発電効率を向上させることが可能となった。本章では MD36G に THS と VPC を適用する場合のシステム構成とその概要を紹介する。

3.1 THS(Turbo Hydraulic System)

3.1.1 クランク軸アシスト

過給機(ターボチャージャ)によりディーゼルエンジンやガスエンジンの給気量を増加させることは、エンジンの出力や効率向上に効果的であり、現在では広く使われている技術である。過給機による空気の圧縮はコンプレッサにより行われるが、その動力源は同軸につながったタービンを介してエンジンの排気ガスエネルギーを利用して行われる。近年では、過給機の性能が改善され、ガスエンジンの要求以上の空気量

を供給できる状況にある。MD36G ガスエンジンでは、余剰の給気については、給気バイパス弁を通じて排気ラインへ逃がすことにより適正な給気量となるよう制御しているが、これは過給機が行った仕事の一部を捨てていることになる。THS は、この余剰エネルギーを油圧に換えて回収し、その油圧を介してクランク軸の回転をアシストすることで、ガスエンジンの燃料消費量を削減し、発電効率を向上させる技術である。もともと船用ディーゼルエンジン向けに当社独自で開発した技術であるが⁴⁾、これを MD36G へ適用し廃熱回収を行うこととした。図 8 にクランク軸をアシストする際の油圧回路を示す。過給機回転軸は減速機を介して油圧ポンプとつながっており、そこで発生した油圧により、油圧モータとつながったガスエンジンのクランク軸回転をアシストするというものである。写真 4 と 5 に、油圧ポンプと油圧モータをそれぞれ示す。油圧モータは、アシスト量を制御するために容量可変型となっている。

3.1.2 過給機回転軸アシスト

THS は油圧ユニットによりポンプとモータの機能を切り替えることができるため、クランク軸から動力を取り出して、過給機回転軸をアシストすることが可能である。図 9 に過給機回転軸をアシストする際の THS 油圧回路を示す。

一般的に、エンジンの低負荷領域における過給機の負荷応答特性は緩慢である。これは、この領域における排気エネルギーが小さく、過給機が回転数を十分に上昇させることができないためである。特にガスエンジンはディーゼルエンジンに比べ空燃比を厳密に調整する必要があり、過給機がエンジン出力上昇のために要求する空気を十分に供給できないことにより、エンジンの負荷上昇速度が制限される。そこで、THS によりクランク軸から取り出した動力で過給機回転軸

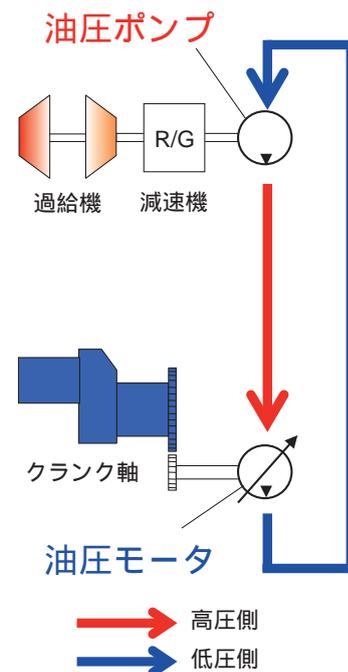


図 8 THS 油圧回路(クランク軸アシスト)
THS Hydraulic Circuit (Assistance of Crank Shaft)

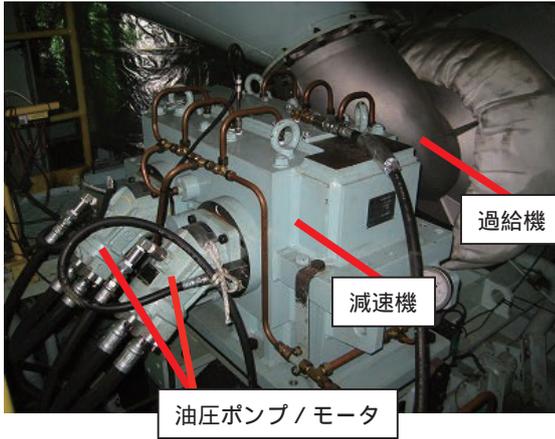


写真4 過給機付きの油圧ポンプ/モータ
Hydraulic Oil Motor/Pump fitted to Turbo Charger

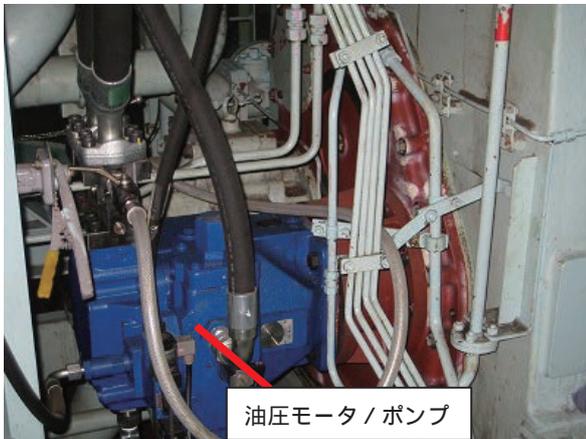


写真5 クランク軸付きの油圧モータ/ポンプ
Hydraulic Oil Motor/Pump fitted to Crank shaft

をアシストすれば、必要な給気量を迅速に供給することが可能となり、MD36Gの負荷追従性を改善することができる。

3.2 VPC(Variable Phase Cycle)

VPCはアメリカのEnergent社により開発された70から250程度の中低温熱源を利用したバイナリー発電技術である⁵⁾。当社はEnergent社からライセンスを受け、船用ディーゼルエンジンの掃気冷却で発生する廃熱の回収にVPCを用いた実績がある⁶⁾。作動媒体として低沸点のR134AやR245faなどの代替フロンが使用されている。ORC(Organic Rankine Cycle)に比べ、VPCは熱交換器で媒体を蒸発させず、液-液で熱交換を行うため、熱交換器をコンパクトに設計できる。また、サイクル上の熱交換の制約(ピンチポイント)がないため、より多くの熱量を回収できるというメリットがある。

今回ガスエンジンの性能向上策の一つとして、VPCを用いて6MD36Gのジャケット水及び排気ガスの廃熱を回収することとした。図10にVPCのプロセス系統図を示す。今回の装置では作動媒体としてR245faを使用している。凝縮器で液化された作動媒体は、ポンプによる加圧状態で二つの別々の熱交換器にて、MD36Gのジャケット水と排気ガスそ

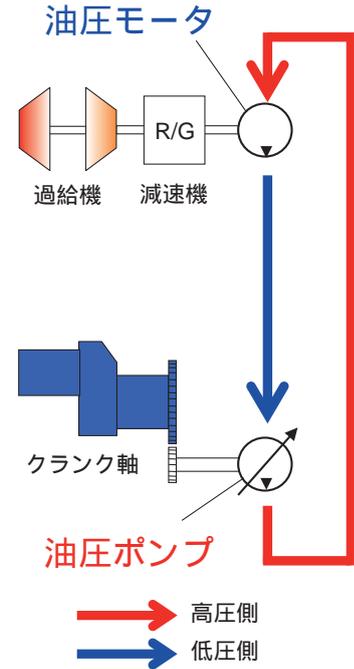


図9 THS油圧回路(過給機回転軸アシスト)
THS Hydraulic Circuit (Assistance of Turbo Charger Shaft)

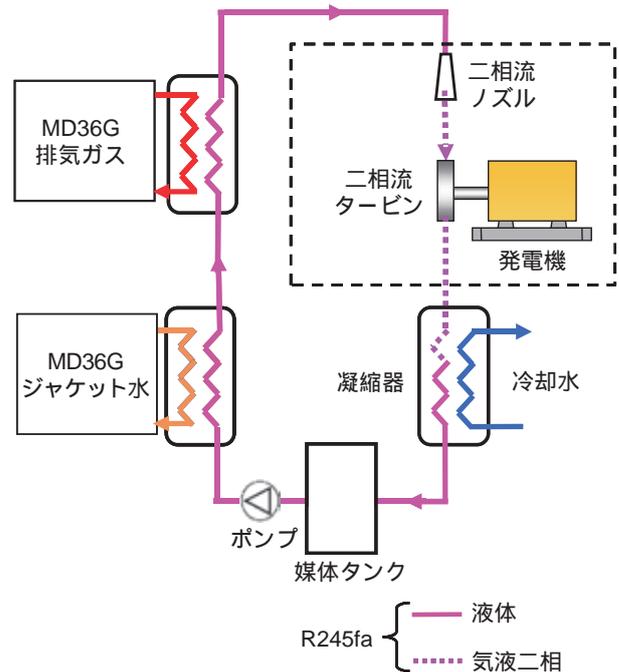


図10 VPCプロセス系統図
VPC Process Diagram

れぞれと熱交換を行い加熱される。その後、二相流ノズルから噴射され、二相流タービンを回転させることで発電が行われる。

4. 総合評価試験

2.及び3.で示した 燃焼室部品の改良、パイロット油分割噴射によりガスエンジン本体の改良を行うと同時に、

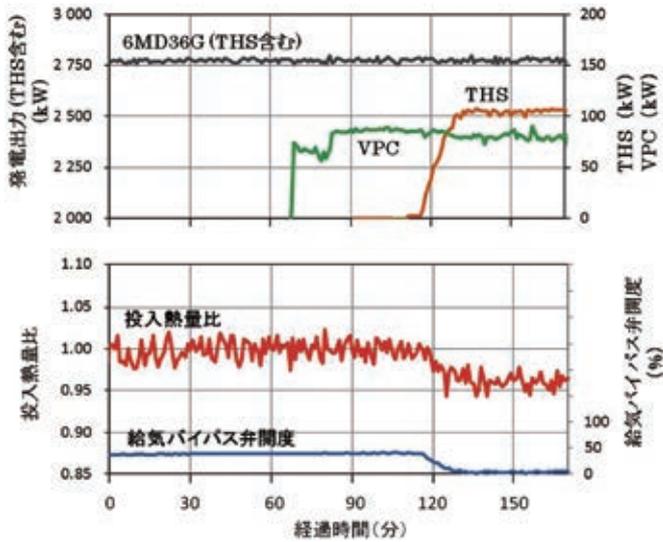


図 11 6MD36G における発電効率評価試験の結果
Integration Test Result at 6MD36G

表 1 6MD36G 発電効率の改善
Improvement of Power Generation Efficiency of 6MD36G

	適用技術	改善率 (%)	発電効率 (%)
従来	-	-	45
	燃焼室部品の改良	3.9	46.8
	パイロット油分割噴射	2.3	47.8
	TTHS	3.4	49.5
	VPC	2.4	50.6

TTHS, VPC という廃熱回収プロセスを組み込んだ総合評価試験を 6MD36G を用いて行った。写真 1 は 6MD36G とこれに付加した TTHS と VPC の熱交換器を配置した発電機室内の外観である。TTHS については、油圧モータと油圧ポンプのほかに、作動油のタンクと油圧切り替えのための油圧ユニットが必要であり、図 1 に示したとおりこれらを架台の上段に設置した。VPC の二相流タービン及び発電機は、今回は配置スペースの都合上、6MD36G とは別の建屋に設置した。

図 11 に発電効率評価試験の結果を示す。まず と の改良を実施済みの 6MD36G で 100 % 負荷にて運転を行った。次に VPC が起動し 6MD36G のジャケット水及び排気ガスから廃熱を回収し発電を開始した。最後に TTHS が起動し、過給機回転軸から動力を回収したため、余剰の給気を逃がしていた給気バイパス弁の開度がゼロとなった。回収した動力でクランク軸回転のアシストを開始したため、出力一定のまま 6MD36G に入力される燃料ガス流量が減少したことが投入熱量比の変化に現れている。以上のように、6MD36G に ~ の効率改善技術を適用して、ガスエンジンの総合システムがそれぞれの技術の干渉なしに安定的に運転できることを確認した。

次に、6MD36G における ~ の効率改善技術による発電効率の改善結果についてまとめたものを表 1 に示す。

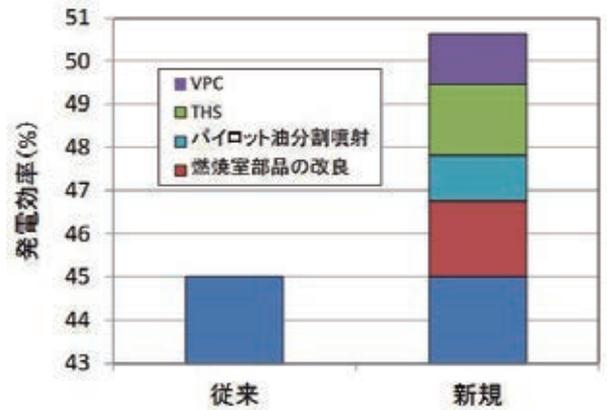


図 12 6MD36G 従来からの発電効率改善
Improvements of Power Generation Efficiency of 6MD36G Gas Engine System from its Conventional Type

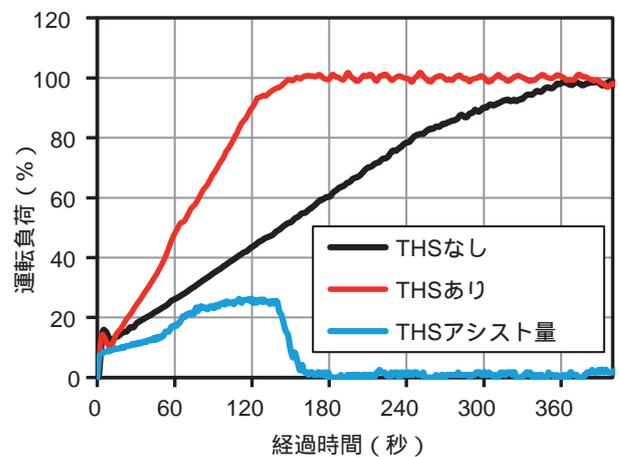


図 13 負荷上昇試験の結果
Load up Test Results

燃焼室部品の改良, パイロット油分割噴射及び TTHS は、発電効率の改善によって出力一定のままガスエンジンに投入される燃料量を削減するものである。VPC は回収した廃熱により独立に発電を行うため、ガスエンジンの出力を含めた発電システムの総合出力を増加させるものである。この表の改善率 (%) は、当該技術が適用される前の発電効率に対する相対的な増加率を表したものである。燃焼室部品の改良により、発電効率は 3.9 % 改善した。パイロット油分割噴射により、発電効率は 2.3 % 改善した。また、パイロット油分割噴射に伴う NOx 排出量の増加はわずか 1 % にとどまり、出力のサイクル変動は従来に比べて 25 % も低下していることを別途確認している。TTHS による発電効率の改善は 3.4 % となり、VPC による発電効率の改善は 2.4 % となった。~ の改善技術を同時に適用する場合、表 1 及び図 12 に示すように 6MD36G の総合発電効率 (TTHS, VPC を含む、以下同じ) は 50.6 % となる。これは従来の発電効率 45 % に対し 5.6 ポイント (12.4 %) の効率改善となる。

最後に、6MD36G において実施した負荷上昇試験の結果を図 13 に示す。TTHS により過給機回転軸をアシストするこ

表2 MD36G シリーズの仕様
Specifications of MD36G Gas Engine

型名		6MD36G	8MD36G	12MD36G	
配列		直列(L型)		V型	
シリンダ数		6	8	12	
シリンダ径	mm	360			
ストローク	mm	480		460	
回転数	min-1	600			
発電出力	kWe	2 760	3 680	5 300	
燃料ガス		都市ガス, 天然ガス			
パイロット油		軽油			
着火方式		筒内直噴マイクロパイロット油			
発電効率	従来	%	45	45	46
	新規	%	47.8	47.8	48.8
	新規(THS, VPC含む)	%	50.6	50.6	51.7

とで、6MD36Gの100%負荷到達までに要する時間が、従来に比べ半分以下(即ち、負荷上昇速度が2倍以上)となることを確認した。

5. おわりに

今回、当玉野事業所の6MD36G開発用設備において、種々の性能改善技術を適用し発電効率が向上することを実証した。さらに、開発した技術をMD36Gの他の出力範囲にも適用した。その結果は表2に示したとおりであり、 燃焼室部品の改良及びパイロット油分割噴射によって、発電効率はL型ガスエンジン(6, 8シリンダ)で47.8%, V型ガスエンジン(12シリンダ)で48.8%となった。さらに廃熱回収技術である THS(Turbo Hydraulic System)と VPC(Variable Phase Cycle)をシステムへ付加することにより、総合発電効率はL型ガスエンジン(6, 8シリンダ)で50.6%, V型ガスエンジン(12シリンダ)で51.7%となった。当社は、高発電効率かつ高信頼性を有するこのMD36Gガスエンジンシステムの更なる性能改善及び開発を今後も継続して行っていく所存である。

なお、本開発(パイロット油分割噴射を除く)は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の助成事業による補助を受けて実施したものである。

参 考 文 献

- 1) クリーンエネルギー編集部: 天然ガスコージェネレーション機器データ 2016, (2016), p.9, 日本工業出版株式会社
- 2) 近藤. 外: 高効率大型ガスエンジンを開発, 三井造船技報, 191(2007-6), p.19

- 3) T. Oka, et al.: Development of Large Gas Engine with High Efficiency (MD36G), CIMAC Congress 2010, Bergen, 115, (2010)
- 4) N. Sakairi, et al.: Development of Turbo Hydraulic System on Large Marine Diesel Engine, CIMAC Congress 2013, Shanghai, 146, (2013)
- 5) P. Welch, et al.: New Turbines to Enable Efficient Geothermal Power Plants, GRC Transactions, 33 (2009), p.765
- 6) 今井. 外: 船用VPCバイナリー発電装置の開発, 三井造船技報, 211(2014-2), p.13

[問い合わせ先]

機械・システム事業本部 機械工場 技術開発部
TEL 0863 - 23 - 2524 黛 健斗



黛 健斗



近藤 守男



岡 俊郎



坂入 信之



加藤 寿子

燃料ガス供給システム用高圧ガス圧縮機の開発

和田 裕太郎* 松丸 康祐* 八木 俊樹*
難波 浩一* 林 弘能** 梶谷 哲平**

Development of High Pressure Gas Compressor for Fuel Gas Supply System

Yutaro WADA, Kosuke MATSUMARU, Shunki YAGI,
Kouichi NAMBA, Hironori HAYASHI, Teppei KAJITANI

Mitsui Engineering & Shipbuilding (MES) recently launched a high pressure gas compressor for fuel gas supply system feeding boil-off-gas (BOG) to ME-GI engine for LNG carrier. The compressor is a reciprocating type based on proved technologies and experiences in oil & gas industries on shore. For off shore application, the five stage compressors of 5MBL with five cylinders and of 6MBL with six cylinders are introduced. The compressor unit mounted on a skid together with auxiliaries is designed with consideration for footprint reduction and the optimized control scheme providing quick responses. The first compressor 6MBL installed in MES Tamano Works successfully started to deliver fuel gas to commercial use ME-GI engine for shop test in July 2015. The quick response of the compressor corresponding to engine transient demands such as fuel changeovers and emergency fuel gas shutdowns was demonstrated.

三井造船は、LNG 運搬船向けの天然ガス焚きの電子制御式ガスインジェクションディーゼルエンジン (ME-GI) に、ボイルオフガス (BOG) を燃料として供給する高圧ガス圧縮機を開発した。陸上のオイル & ガス分野での高い技術と豊富な納入実績に基づき、5 段階圧縮でシリンダ数 5 本の 5MBL タイプ及びシリンダ数 6 本の 6MBL タイプの往復動ガス圧縮機をリリースした。船内ではガス圧縮機を設置するスペースに限りがあるためガス圧縮機本体と補機をスキッドに一括搭載してフットプリントを抑えた設計を行った。またエンジンデマンドに十分追従するように圧縮機の制御システムを構築した。重油と天然ガスの燃料切換えや緊急燃料ガス遮断のようなエンジンのデマンドに対して、本ガス圧縮機は優れた過渡応答性能を示した。

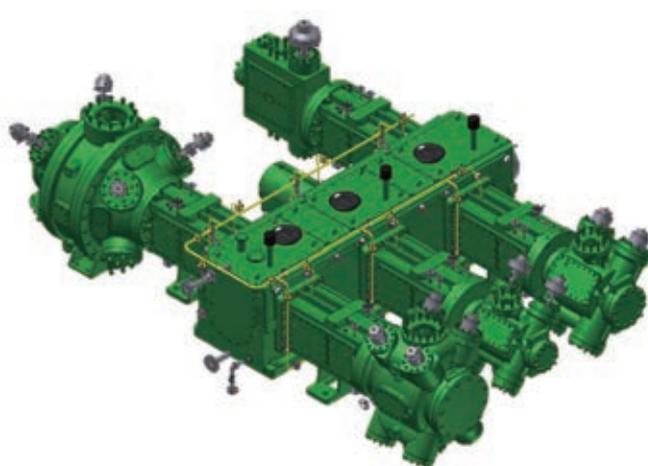


図 1 5MBL 往復動ガス圧縮機本体構造
5MBL Compressor

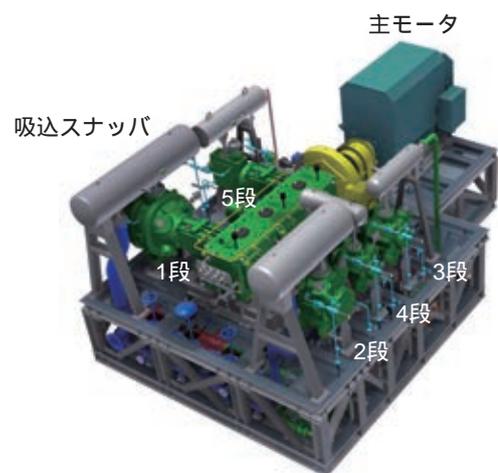


図 2 5MBL のスキッド上設置モデル
5MBL Compressor Unit

* 機械・システム事業本部 機械工場 技術開発部

** 技術開発本部 技術開発センター

1. はじめに

船舶から排出される大気汚染物質の規制が国際海事機関 (IMO) によって策定され、CO₂、NO_x 及び SO_x に対する厳しい排出規制が始まっている¹⁾。そのソリューションの一つとして、排気ガスのクリーンな天然ガス燃料が、次世代の船用燃料として注目を集めている。また、米国のシェールガス革命をきっかけに、グローバルな天然ガストレードが活況を呈しており、天然ガスを海上輸送する LNG 運搬船の需要は、カーゴタンク容量が 18 万 m³ 規模の大型運搬船から 8 万 3 千 m³ 規模の比較的中型のものまで今後も続くと予想される。原油価格が一時期に比べて低下傾向を示している現状においても、安価な燃料として、天然ガスへの期待は大きい。LNG 運搬船に限らず、環境負荷を低減すると同時に輸送コストを削減する観点から、天然ガスを主機燃料として推進する船舶の需要は、着実に高まることが予想されるため、船用エンジン向けの燃料ガス供給システム (Fuel Gas Supply System: FGSS) 開発は急務である。

三井造船は、MAN Diesel & Turbo 社と共同で世界初のガス焼き低速ディーゼルエンジン (Gas Injection Diesel Engine: GIDE) を開発し²⁾、当社千葉事業所に設置した発電設備において、1994 年から 2001 年までの間に累計約 20 000 時間に及ぶ実証運転を行った (写真 1)。これをベースに、天然ガスと重油の両方を燃料として使用できる二元燃料 (Dual Fuel: DF) 対応の ME-GI エンジンが船用主機として登場した。日本国内では、当社が 2015 年に ME-GI エンジンの商用初号機を完成させ、出荷を開始した。

一方、当社はこれまでに 1 100 台以上の往復動ガス圧縮機を主に石油化学プラントのプロセス用途に納入している。都市ガスを燃料とした GIDE にも当社の往復動ガス圧縮機を用い、順調に稼働した。このような陸上分野の実績を踏まえて、今後 ME-GI エンジンの需要が見込まれることから、往復動ガス圧縮機を用いる FGSS を商品化した。初号機は、当社玉野事業所の ME-GI エンジン試運転設備の FGSS にデモンスト

レーション機として導入し、商用 ME-GI エンジンの出荷試験に運用している。本報では、FGSS 高圧ガス圧縮機の概要と商用 ME-GI エンジンに燃料ガスを供給した運転結果について報告する。

2. 三井造船の往復動ガス圧縮機の概要

2.1 ガス圧縮機の納入実績

表 1 に、当社の各種往復動ガス圧縮機の納入事例を抜粋して示す。1961 年より玉野事業所において設計及び製造を開始した。1968 年には吐出圧力 36 MPa のアンモニアプラント用高圧ガス圧縮機を納めた。その後 1982 年に、写真 2 に示す当時としては最大級のハイドロクラッキング用高圧水素ガス圧縮機をはじめ、石油精製プラント向けに多数の水素ガス圧縮機を納入した。1992 年には吸込ガス温度が - 100 の低温エチレンボイルオフガス圧縮機を納入した。また、上述の GIDE 用の燃料ガス供給圧縮機を製造し、メタンリッチ都市ガスを 30 MPa まで昇圧して GIDE に供給した。その後 2015 年には往復動ガス圧縮機の累積出荷台数が 1 100 台を超えた。

表 1 三井造船の往復動ガス圧縮機の納入実績
Delivery Record of Reciprocating Gas Compressors by MES

1961	玉野事業所にて往復動圧縮機の製造を開始 国内向けにガスエンジン駆動のガス圧縮機 6 台を納入
1968	イラク向けにアンモニアプラント用高圧ガス圧縮機 (吐出圧力: 36 MPa) を納入
1982	世界最大級 (当時) の石油精製プロセス向け高圧水素 ガス圧縮機 (動力: 6 725 kW) を納入
1992	サウジアラビア向けにエチレンボイルオフガス圧縮機 (吸入温度: - 100) を納入
1994	GIDE 用燃料ガス供給圧縮機を納入 (CH ₄ リッチガス, 吐出圧力: 30.4 MPa, 吐出流量: 6 800 kg/h)
2013	トルコ向けに世界最大級の水素サービス用ガス圧縮機 (吐出圧力: 15.9 MPa, 動力: 9 500 kW) を納入
2015	累計納入実績が 1 100 台に到達

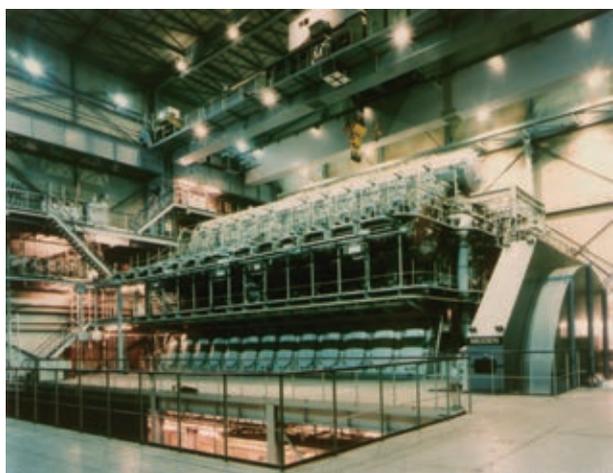


写真 1 ガス焼き低速ディーゼルエンジン (GIDE)
Gas Injection Diesel Engine (GIDE)



写真 2 高圧水素ガス圧縮機 (動力: 6 725 kW)
High Pressure Hydrogen Gas Compressor (Power: 6 725 kW)

2.2 ガス圧縮機の特長

当社の往復動ガス圧縮機は水平対向式である。また、世界的に有名な規格である API 618 (米国石油協会規格 618) に準拠しており、長期の厳しい運転条件に耐えるように設計・製造されている。図 3 に、三井往復動ガス圧縮機の基本構造を 4 シリンダの場合を例にして示す。

基本構造はクランクシャフトを挟んでシリンダを水平に対向させて配置する水平往復動タイプである。これにより、往復動のアンバランス力をほぼゼロにすることが可能であり、運転時の振動を最小限に抑えることができる。また、各シリンダが別れており水平方向に配置されているため、点検時に容易にアクセスでき、メンテナンス性にも優れている。

主要部品に対して圧力荷重や熱荷重による応力解析、往復運動に対して振動解析、更に付属する配管系も含めた圧力脈動解析を実施して、API 618 の要求を満足することを確認している。また、ピストンリング及びロッドパッキンリング並びにロッド軸芯を維持するライダーリングには、長寿命のフッ素樹脂系材料を採用しており、無潤滑条件の運転も可能である。一方、クロスヘッド摺動部には強制給油方式を採用しており、耐摩耗性の面で長期間の安定な運転が可能となっている。

運転中は、圧縮機本体の振動、主軸受の温度、ピストンのロッドドロップなどを監視している。ロッドドロップの監視はライダーリングの摩耗による軸芯の下がりを検知するために必要で、シリンダライナとピストンとの金属接触を予防するため、ライダーリングの交換時期を予測するために使用する。

3. LNG 運搬船向け FGSS

LNG 運搬船では、カーゴタンクへの外部からの入熱により気化するガス (Boil off Gas : BOG) を安全にかつ経済的に処理する必要がある。従来の LNG 運搬船の推進システムでは、BOG を DF ボイラの燃料として用い、スクリュウに直

結した蒸気タービンを駆動する方式が一般的であった。その後、BOG を燃料として DF 中速ディーゼルエンジンにより発電してモータ駆動により推進するシステムも提案された。LNG 運搬船のカーゴタンク容量は、各地の LNG 受入れ基地側のサイズや貯蔵容量の物理的制限、北米からシェールガスを運搬するときに新パナマ運河を通過できる船幅などの制約から、最近の主流は 155 000 m³ ~ 180 000 m³ である³⁾。カーゴタンク容積に対する BOG の発生率はカーゴタンクの防熱性能に左右され、モス方式の場合 0.08 %/d、一方メムブレ方式の場合 0.1 %/d 程度に改良されつつあるが、効率の高い BOG の利用方法が依然として求められている。燃費性能に優れた ME-GI エンジンに直接 BOG を高压ガス圧縮機により 30 MPa に昇圧して供給する FGSS はこれに合致するものとして提案された⁴⁾。

図 4 は当社が開発した高压ガス圧縮機と高压液ポンプ方式を併用した場合の FGSS の系統図であり、FGSS の運用方法は次のとおりである。

積荷航海時や空荷航海時のタンク冷却スプレー作業中には、BOG をそのまま高压ガス圧縮機によって昇圧して ME-GI エンジンに供給する。船の推進速度に応じて BOG だけでは ME-GI エンジンが要求する燃料量をまかなえない場合は、高压液ポンプのラインからも燃料を供給する。また空荷航海時にスプレーを行わず BOG が十分な量発生しない場合にも、液ポンプのラインから燃料を供給する。一方、BOG 発生量が ME-GI エンジンや後述の船内補機動力用 DF ディーゼル発電機での消費量を上回る場合は、その余剰 BOG を燃焼器により焼却処理するか、あるいは BOG を部分的に再液化して LNG タンクに還流させる⁵⁾。

このように FGSS において高压ガス圧縮機は中心的な機器となり、当社が石油化学プラント向けに蓄積した往復動ガス圧縮機の納入実績と技術及び制御技術を基に開発することが可能である。

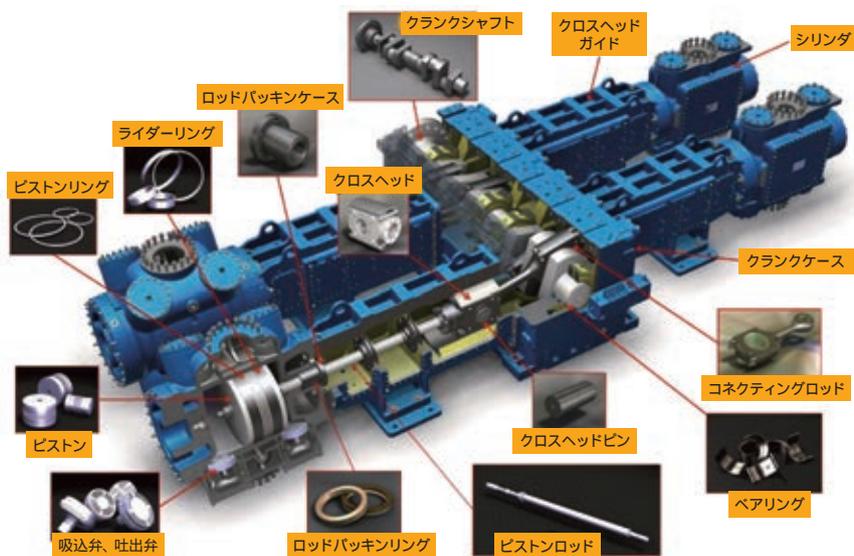


図 3 三井造船の往復動ガス圧縮機の基本構造
Basic Structure of MES Reciprocating Gas Compressor

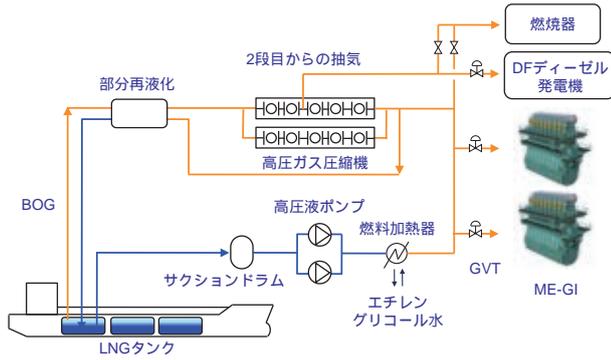


図4 LNG 運搬船のFGSS 例

Schematic of FGSS Example for ME-GI Powered LNG Carrier

表2 高压ガス圧縮機 MBL の主要目
General Specification

	標準仕様	適用範囲
圧縮段数	5	5
シリンダ数	5	5(or 6)
最小吸込圧力(MPa)	0.103	0.103
吸込温度()	- 110	- 162 ~ 30
最大吐出流量(kg/h)	3 700	4 500
最終段吐出圧力(MPa)	24 ~ 33.5	24 ~ 33.5
最大動力(kW)	1 215	1 500
回転数(rpm)	590	590

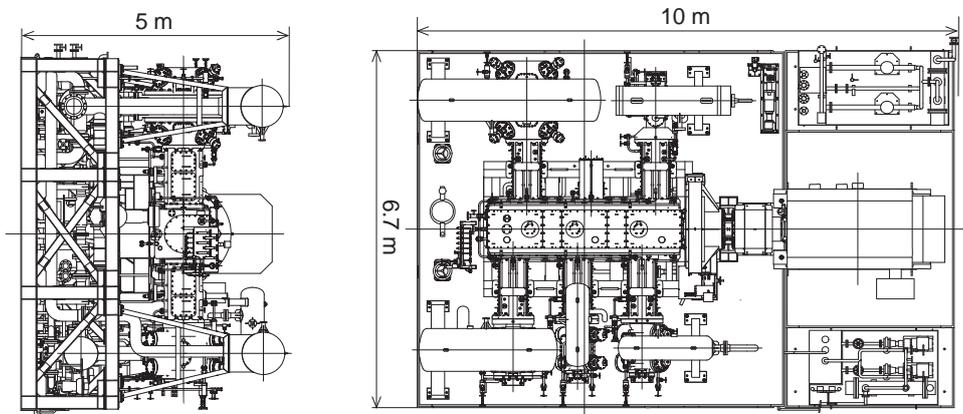


図5 5MBL 圧縮機ユニットの外形寸法
Footprint of 5MBL Compressor Unit

4. FGSS 用高压ガス圧縮機

4.1 基本仕様

FGSS 用に採用したものは、陸上分野の実績が豊富な水平対向式往復動圧縮機(Mitsui Balanced Compressor Large Type : MBL)である。表2に高压ガス圧縮機 MBL の主要目を示す。カーゴタンク容量が 18 万 m³ の大型 LNG 船向け圧縮機を標準仕様として、エンジンのデマンド等の許容範囲を確保できるように、適用範囲を設定した。

圧縮は 5 段階として、吸込温度と吐出流量に応じてシリンダ数が 5 本の 5MBL あるいは 6 本の 6MBL となる。標準仕様では吸込温度が - 110 のとき 3 700 kg/h をエンジンに対して供給する。その場合の動力は吐出圧力が 31 MPa のとき 1 200 kW 程度である。また、吸込温度は - 162 から常温まで対応できる。吐出流量は現在主流の LNG 運搬船カーゴタンク容量と自然気化率(BOG レート)を前提として、ME-GI エンジン及び船内補機動力用の DF ディーゼル発電機への供給にも対応することを想定して最大 4 500 kg/h に設定した。なお、最終 5 段目の吐出圧力はエンジン供給圧力デマンドに応じて、またエンジンまでの配管圧力損失を考慮して 24 MPa ~ 33.5 MPa に制御される。回転数は一定の 590 rpm である。なお、ここでは最大吐出流用を 4 500 kg/h

としたが、回転数とストロークの調整によっては 5 500 kg/h まで対応可能となる。

4.2 ガス圧縮機ユニット

図2に 5MBL ユニット外観図を示す。ガス圧縮機本体、主モータ、補機類(後述のガスクーラ、脈動吸収用スナッパ、バイパス制御弁など)をスキッド上にすべて搭載するユニット設計を行い、ヤードでの艀装が容易になるように配慮した。そのほかにも、船内でのメンテナンス作業に支障をきたさないスペースの確保に配慮した。このときスキッドの荷重が過大にならないような梁寸法の選定するとともに、リブを使用することにより剛性を確保し、スキッドの固有値と圧縮機回転周波数が一致しないようなスキッドの設計を行った。また、圧縮機スキッドと電動機スキッドを分離することにより電動機への振動を低減させたほか、球面形状の座を有する特殊な固定器具を用いて圧縮器のアライメントに配慮し、スキッドへの据え付けを容易にした。また、ガスクーラに関しては従来までのシェル & チューブ式ではなくプレート式を採用した。これにより、ガスクーラがコンパクトになり、ユニットの大幅な小型化が可能になった。ユニットの総重量は約 100 ton である。図5にユニットのフットプリントを示す。ユニットの幅を抑えるため、ショートストロークを採用して、幅 6.7 m、長さ 10 m 及び高さ 5 m である。

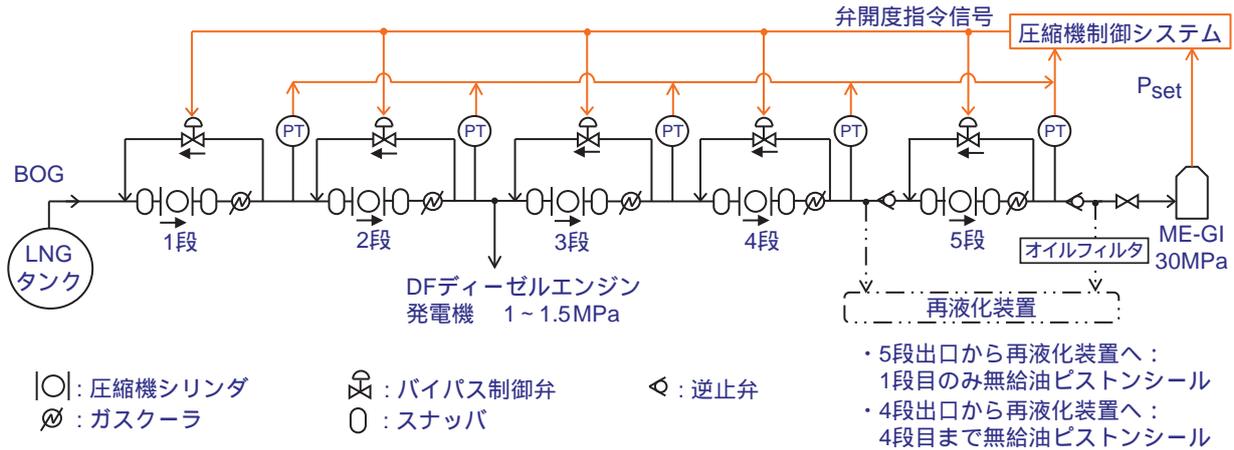


図6 5MBL 圧縮機制御フロー模式図
Control Schematic of 5MBL Compressor

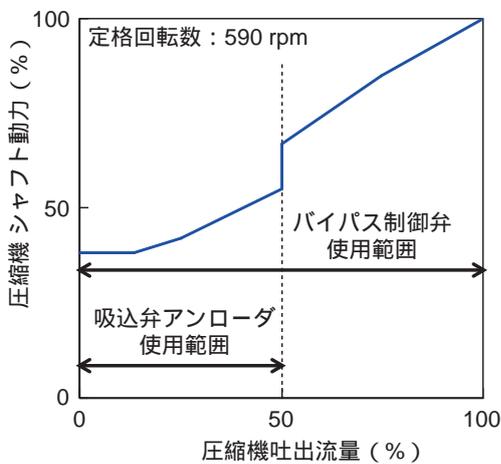


図7 部分負荷運転のための制御方法
Part Load Operation with Power Saving

4.3 ガス圧縮機制御

図6に、5MBL ガス圧縮機の制御フローを示す。ガス圧縮機制御システムへのインプットはME-GI エンジンからの燃料供給圧力デマンド (P_{set}) 及びエンジン出力である。エンジンデマンドに対して、十分な応答性能を実現するために、各段の吐出温度を制御するガスクーラ、吐出流量を制御するバイパス制御弁及び吸込側と吐出側の両方に脈動吸収するスナッパを全段に装備している。5 段目のバイパス制御弁はエンジンへの燃料供給圧力がエンジンからの P_{set} に一致するように制御される。その上流側1 段～4 段までは段ごとに所定の吐出圧力となるように、各段のバイパス制御弁が調整される。

図7に、ガス圧縮機の吐出流量と圧縮機シャフト動力の関係を無次元化して示す。回転数は590 rpm 一定である。吐出流量が50% から100% の場合は、5 段のバイパス制御弁はエンジンの P_{set} に対応して制御される。一方、残りの段のバイパス制御弁はエンジン負荷に応じてあらかじめ設定されている各段の吐出圧力に制御される。また、吐出流量が50% 以下の場合は、上述のバイパス制御弁に加えて、シリンダに搭載した吸込弁アンローダを組合せて作動させる。な

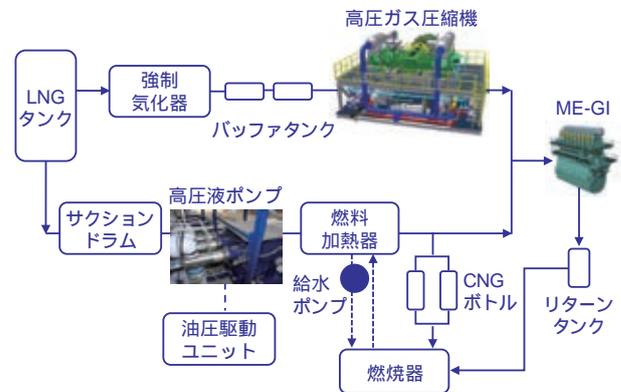


図8 当社玉野事業所のFGSS 設備構成
System Diagram of FGSS at MES Tamano Works

お、吸込弁アンローダとは吸込弁を開放状態に固定した状態で運転するための機構で、吸込弁アンローダを動作させるとステップ状に吐出流量が減少する。

5. FGSS 用高压ガス圧縮機の実証運転

5.1 FGSS 実証設備

当社は、2013 年に高压液ポンプと気化器を用いたFGSS を当社玉野事業所のME-GI エンジン陸上試運転設備用に設置した。その後、上述のFGSS 用高压ガス圧縮機の初号機6MBL を追加して、図8 に示す高压ガス圧縮機と高压液ポンプを組合せたFGSS を2015 年6 月に完成させた。陸上設備ではあるが、世界で初めて商用ME-GI エンジンに対して高压ガス圧縮機と高压液ポンプを併用するハイブリッド型のFGSS を実現した。本FGSS では、LNG 貯槽タンクが実際のLNG 運搬船カーゴタンク容量に比べ小さいので、十分なBOG を確保するために本ガス圧縮機の上流側に強制気化器を配備した。写真3 に、6MBL ガス圧縮機ユニットを上空から見た状況を示す。常温の場合でも4 000 kg/h 燃料ガスを吸い込めるように、1 段目のシリンダを2 本とする6MBL を採用した。また陸上設備用のガス圧縮機には運転状況を間近で見学できるようにオープンデッキを設けた。2015 年10 月には国内外から

船主、造船所など関連客先を招待して ME-GI エンジンにガス燃料を供給する高圧ガス圧縮機のデモンストレーション運転を行った。

5.2 商用 ME-GI エンジンへの燃料供給

高圧ガス圧縮機を単独で運転する場合と高圧液ポンプと並列運転で運転する場合について、それぞれ出力を上昇させる

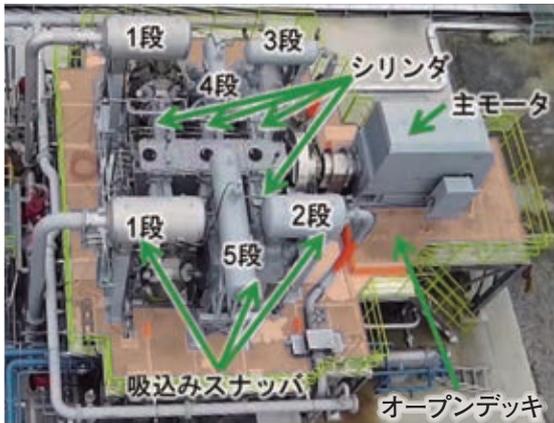


写真3 6MBL 圧縮機ユニットの鳥瞰図
Bird's eye view of 6MBL Compressor Unit

場合と緊急停止する場合の過渡応答特性をシミュレーションで把握した後、本設備で実運転を行い本 FGSS の性能及び安全性の確認を行った⁶⁾。

5.2.1 高圧ガス圧縮機単独運転

図9及び図10に、商用 ME-GI エンジンに本ガス圧縮機単独で燃料供給を行ったときの運転チャートである。縦軸は圧力及びエンジン負荷の値で表わした。図9はエンジンへの燃料供給モードを重油モードからガスモードに切替えたときの運転チャートである。最初にエンジンは負荷80%で重油運転されており、ガス圧縮機は吐出圧力が約24MPaのスタンバイモードで運転されている。エンジンからのPsetがガス圧縮機制御システムに送られると、直ちにガス圧縮機はバイパス制御弁を閉じてエンジンへの燃料ガスの供給を開始する。その後Psetに応じて一定流量で燃料ガスを供給する。燃料ガスへの切替えが始まると、燃料ガスによるエンジン負荷はスムーズに上昇し始め80%に達した時点で重油からの燃料切替えは完了する。なお、ガスから重油への切替え運転も同様にスムーズに行われる。一方、燃料ガスによる100%負荷運転中に緊急ガスシャットダウンを行ったときの燃料ガス圧縮機の過渡応答チャートを図10に示す。緊急燃料ガス遮断の指令を受けたとき、すなわちPset値が落ちるとガス

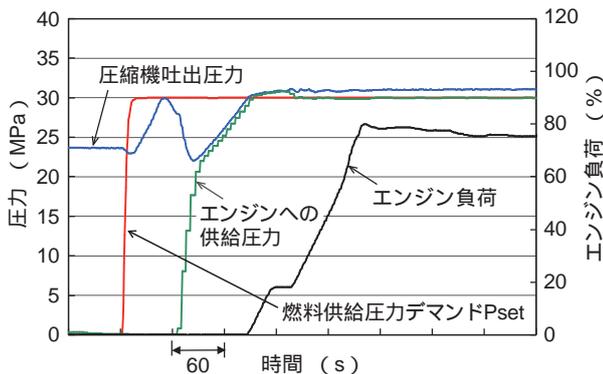


図9 燃料切替え運転
(ガス圧縮機単独供給の場合)

Fuel Change Over Operation with Gas Compressor Alone

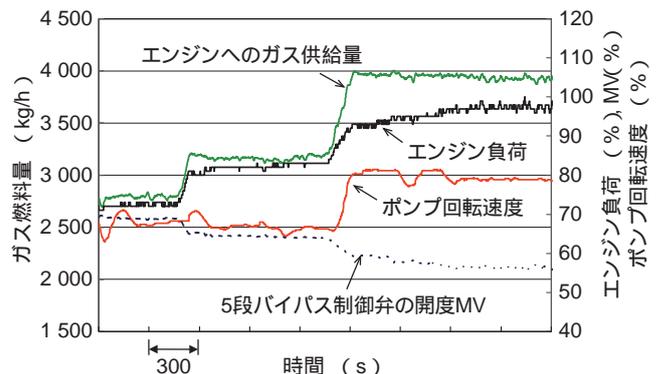


図11 エンジン負荷上昇
(ガス圧縮機及び液ポンプによる燃料ガス供給)
Engine Load Up with Gas Compressor and LNG Pump

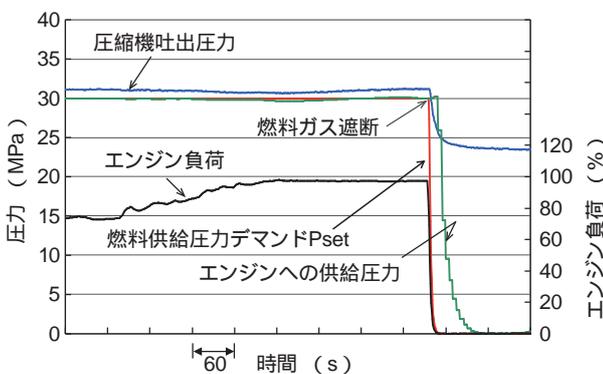


図10 緊急燃料ガス遮断での過渡応答性能
(ガス圧縮機単独供給の場合)

Transient Response at Emergency Fuel Gas Shutdown with Gas Compressor Alone

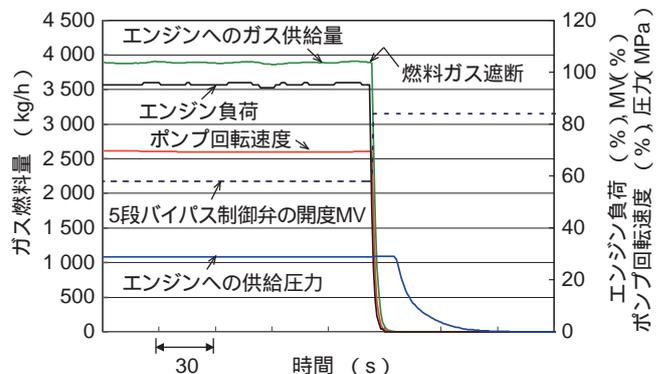


図12 緊急燃料ガス遮断での過渡応答性能
(ガス圧縮機及び液ポンプによる燃料ガス供給)
Transient Response at Emergency Fuel Gas Shutdown with Gas Compressor and LNG Pump

圧縮機は直ちにバイパス制御弁を開き、エンジンへの燃料供給を停止すると同時に、スタンバイ運転に移行する。この際、過渡的に不安定な吐出圧力の上昇は発生していないことが分かる。

5.2.2 高圧ガス圧縮機及び高圧液ポンプ並列運転

図 11 及び図 12 に、高圧ガス圧縮機と高圧液ポンプの並列運転により ME-GI エンジンへ同時に燃料供給を行ったときの運転チャート例を示す。ガス燃料量、ME-GI エンジン負荷、弁開度 (MV)、液ポンプ回転速度の値をそれぞれ縦軸にとって表わした。ここで、液ポンプ吐出流量を表わすパラメータとしてはその回転速度を、またガス圧縮機の吐出の流量を表わすパラメータとしては 5 段バイパス制御弁開度を用いた。図 11 は、エンジン負荷を 100% まで上昇させる過程の運転例である。エンジン負荷を 75% から 85% に上昇させる際は、ガス圧縮機からの供給量を増加させた。このとき、液ポンプ回転数はほぼ一定であるが、バイパス制御弁開度は低下している。その後 100% に負荷を上げる際は、ガス圧縮機と液ポンプからの供給量を同時に増加させたため、液ポンプ回転数は上昇し、バイパス制御弁開度は更に低下している。なお、ここでは高圧液ポンプをエンジンへの供給圧力制御に使用し、一方で高圧ガス圧縮機をエンジンからの出力デマンドに応じて運転した。図 12 は、ガス圧縮機及び液ポンプ両方からガス燃料を供給中に、緊急ガスシャットダウンを行ったときの FGSS 過渡応答チャートである。縦軸は図 11 と同様であるが、ガス圧力も併せ示した。緊急燃料ガス遮断の指令を受けたとき、ガス圧縮機は直ちにバイパス制御弁を開きスタンバイ運転にスムーズに移行する。同時に液ポンプは回転を停止し、エンジン供給圧力が過渡的に不安定上昇することなく、エンジンへの燃料供給が安全に停止されている。

6. おわりに

1961 年以来、主に石油精製プラント向けに 1 100 台に及ぶ当社往復動ガス圧縮機の納入実績及びその間に蓄積された技術に基づいて、LNG 運搬船向け ME-GI エンジンへの燃料ガス供給システム用の高圧ガス圧縮機を開発した。フットプリントを抑え、ヤードでの艀装を容易にする圧縮機ユニット設計を行った。その初号機を当社玉野事業所の FGSS に導入して、商用 ME-GI エンジンに燃料供給する実証運転を行った結果、エンジンのデマンドに追従する優れた過渡応答性能を示した。

今後は FGSS 実証設備を ME-GI エンジンの陸上試運転用及び燃料ガス圧縮機の出荷試験用設備として運用することにより、ME-GI エンジンと FGSS 用高圧ガス圧縮機を組み合

わせた統合試験ができる世界で唯一のメーカーとして、一括受注・試運転・出荷に対応できる体制で望む所存である。

参 考 文 献

- 1) IMO : Revised MARPOL Annex VI- Regulations for the Prevention of Air Pollution from Ships 2008, 2009
- 2) P. S. Pedersen, et al. : "Development of the World's First Large-Bore Gas-Injection Engine", 21st CIMAC, Interlaken 1995
- 3) 渡邊 . 外 : 日本マリンエンジニアリング学会誌 , 49-1 (2014-1) , 13-19
- 4) MAN Diesel & Turbo : ME-GI Dual Fuel MAN B&W Engines - A Technical, Operational and Cost-effective Solution for Ships Fuelled by Gas, p.13, <http://marine.man.eu/two-stroke/technical-papers>, (2016-9-6)
- 5) 柴田 . 外 : ハイブリッド LNG 供給システムの開発 , 三井造船技報 , 216(216-2) , p.7
- 6) K. Namba, et al. ; Development of Mitsui High-Pressure Compressor for Fuel Gas Supply System of ME-GI engine, CIMAC Congress 2016, Helsinki, 168 (2016-6)

[問い合わせ先]

機械・システム事業本部 ディーゼル営業部
TEL 03 - 3544 - 3475 中野 均



和田 裕太郎



松丸 康祐



八木 俊樹



難波 浩一



林 弘能



梶谷 哲平

メタンハイドレート塊の自己保存現象への 高濃度塩化ナトリウムの影響

三 町 博 子 村 山 哲 郎

Influence of High Concentrated Sodium Chloride on Self-Preservation of Methane Hydrate Mass

Hiroko MIMACHI, Tetsuro MURAYAMA

To investigate the dissociation behavior of the methane hydrate, the lumps of the methane hydrate containing sodium chloride (NaCl) mass fraction of 0.005 and 0.027 were stored at -20°C under ambient pressure as test samples. Initial hydrate ratios of each sample of 10-20 mm diameters were almost same (i.e. 84 % and 82 % respectively). Hydrate ratio of the sample with NaCl mass fraction of 0.005 remained at around 80 % in 7 days storage, while the hydrate ratio of the sample with that of 0.027 was drastically decreased to below 10 % in the same period. Phase contrast X-ray CT was carried out on the methane hydrate samples to observe the internal texture of the sample in different dissociation stages. It revealed that: Lower the hydrate ratio was, the wider the high degradation part spread through the whole of the sample. In other words, dissociation from inside of the methane hydrate sample was clearly observed. The observation by scanning electron microscope has found a NaCl concentration section in the microstructure of the methane hydrate. Such NaCl concentration section was supposed to be the origin of the sample internal dissociation.

塩化ナトリウム(NaCl)を質量分率で0.005又は0.027含むメタンハイドレート塊を、 -20°C 、大気圧の下で貯蔵し、分解過程を観察した。径10～20mmのメタンハイドレート試料の初期ハイドレート率は、NaClの質量分率が0.005の試料が84%、0.027の試料が82%で同等の値であった。一方、前者の試料は貯蔵7日が経過してもハイドレート率は80%程度に留まったが、後者の試料は分解が進行してハイドレート率10%未満にまで低下した。これらの分解進行度の異なるNaCl含有メタンハイドレート塊の内部を位相X線CTで観察すると、ハイドレート率の低い試料ほど広範囲にわたって分解進行度の高い部位が出現しており、NaClを含有するメタンハイドレート塊は試料内部からも分解することが明らかになった。また、走査電子顕微鏡による微細構造観察から、メタンハイドレート結晶粒界にNaCl濃集部が確認され、ここが試料内部の分解起点になっていることが示唆された。

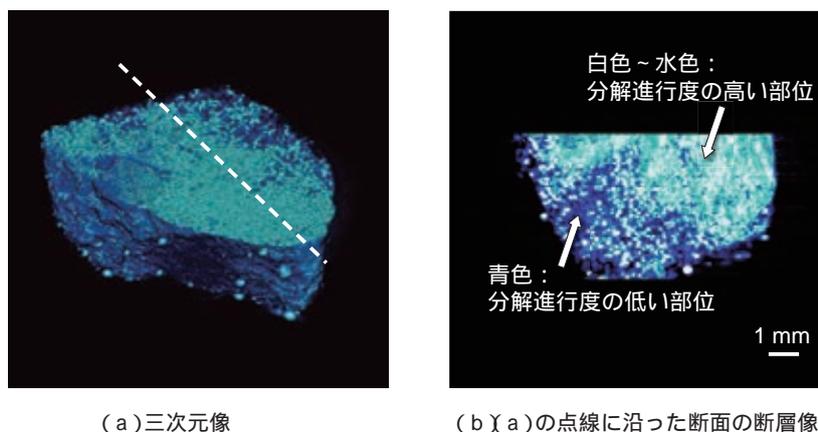


図1 -20°C 、大気圧で7日間貯蔵した、NaClの質量分率0.027のメタンハイドレート塊の位相X線CT像
Phase Contrast X-ray CT Image of Methane Hydrate Mass containing 0.027 NaCl in Mass Fraction stored
at -20°C and Ambient Pressure for 7 days
(a) 3D Image, (b) Cross Section Image along the Dotted Line

1. はじめに

メタンハイドレートは、水分子が形成する籠状構造の中にメタンが包接された包接水和物(クラスレートハイドレート)の一種であり、外観は氷とよく似ているが、火を近づけると燃えることから、「燃える氷」と呼ばれることもある。通常は低温かつ高圧雰囲気中で安定に存在し(図2)¹⁾、例えば、大気圧(0.1 MPa)では-80 °Cもの低温で、また、0 °Cであっても約3 MPaの高圧雰囲気中で安定に存在する。このような条件の下で水とメタンが共存するとメタンハイドレートは生成するため、永久凍土層や1000 m程度以深の海底面及び海底面下では天然のメタンハイドレートの存在が確認されている²⁾⁻⁴⁾。

メタンハイドレートの代表的な特徴の一つに自己保存と呼ばれる現象がある。これは、通常は低温高圧雰囲気中で安定なメタンハイドレートが、その条件から大きく外れた-20 °C程度の低圧雰囲気中で分解抑制される現象である⁵⁾⁶⁾。低温、高圧雰囲気中で安定に存在するメタンハイドレートをこのような温度、圧力条件下に移すと、メタンハイドレートは分解を開始し、それによって氷*とメタンガスを生じる。分解によって生じた氷が、残存しているメタンハイドレートの表面に付着して氷膜を形成し、メタンガスの拡散が阻害されるため、自己保存現象が生じる(図3)⁵⁾。同様の現象は二酸化炭素ハイドレートなど、他のいくつかのクラスレートハイドレートでも確認されているが⁷⁾⁻⁹⁾、その機構の全容は明らかになっていない。これは自己保存現象が、ガスの種類だけでなく、電解質・添加物等¹⁰⁾⁻¹²⁾によっても変化するためである。特に電解質については、Satoらは34 mol/m³(塩化ナトリウム換算で質量分率0.002相当)の電解質を添加した水から生成した粉末状のメタンハイドレートにおいて、自己保存現象が電解質と水との共晶点温度を超えると弱まる傾向を見出した¹²⁾。

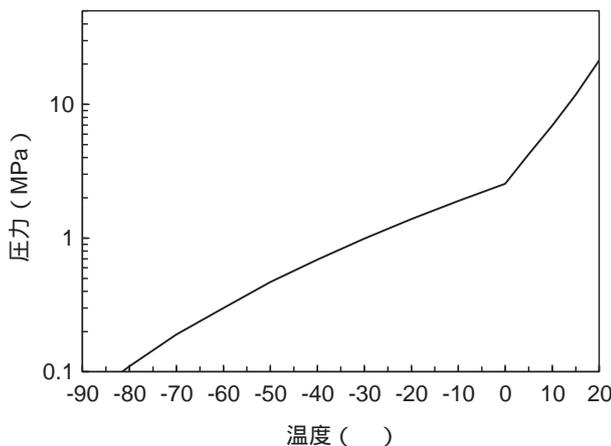


図2 メタンハイドレートの平衡曲線¹⁾
Equilibrium Line of Methane Hydrate

一方、自己保存現象を利用したメタンハイドレートの貯蔵を目的とする場合には、メタンハイドレートのペレット化によるハンドリング性の向上¹³⁾やメタンハイドレートの分解抑制が報告されている¹⁴⁾。本報では、ペレット化したメタンハイドレート(以下、メタンハイドレート塊)の貯蔵における電解質の影響に関し、電解質の代表物質として塩化ナトリウム(以下、NaCl)を選定し、-20 °C、大気圧下でのメタンハイドレート塊の分解過程を調査することで、自己保存機構への電解質の影響を検討した。

2. 実験方法

2.1 試料の製造

メタンハイドレート塊は図4に示すハイドレート生成圧搾装置で製造した。内容積 $9 \times 10^4 \text{ m}^3$ の反応器に質量分率0~0.1のNaCl水溶液を入れ、温度0~4 °C、圧力5.5 MPaのメタンガス雰囲気の下、攪拌による気液接触でメタンハイドレートスラリーを生成した。生成したメタンハイドレートスラリーは反応器の下部に設置した、33 mmの一軸型の圧搾成形器に導入し、複数回の圧搾で徐々にメタンハイドレート層を積層して、長さ約100 mmの円柱状のメタンハイド

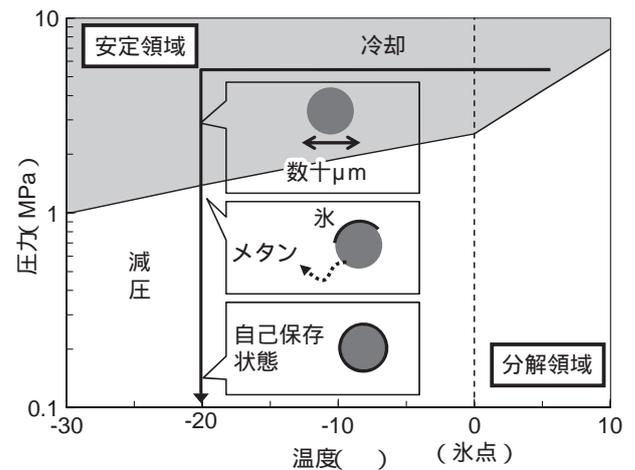


図3 自己保存現象の発現機構⁵⁾
Self-preservation Mechanism

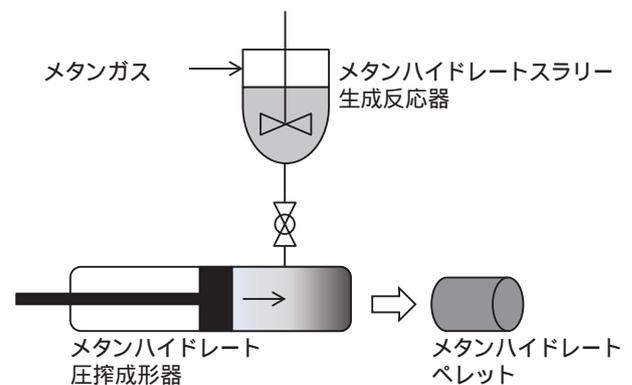


図4 ハイドレート生成圧搾装置の構成
Schematic Image of the Hydrate Formation Reactor Equipped with Compression Machine

* ガスハイドレートの分解開始直後には、氷点下であっても一時的に液体の水が存在するとの報告もあるが¹⁵⁾、ここでは氷点下での水の安定相である氷とした。

レート塊に成形した。メタンハイドレート塊は - 20 に冷却した後、装置内の圧力を大気圧まで減圧して、装置から取り出した。また、メタンハイドレート塊中に含まれる NaCl 濃度は、試料を室温で完全に分解した後に残留した水溶液の電気伝導率から求めた(電気伝導率計 ES-51, 株式会社堀場製作所製)。

2.2 貯蔵試験

メタンハイドレート塊は - 20 にて 粉碎と篩分けによって 10 ~ 20 mm の試料径に調整した。試料は、メタンハイドレート塊の分解に伴うメタンガスの発生による容器内の圧力上昇を防ぐため、外気に通じる小穴を設けたプラスチック製の容器に入れ、- 20 で 7 日間貯蔵した。貯蔵中はメタンハイドレート塊の分解によって質量が減少するため、試料の質量計測から分解ガス量を求めた。さらに、分解ガス量に基づく指標として、試料中のメタンハイドレートの質量比率を表すハイドレート率 $H(\%)$ を用いた(式(1))。

$$H = \frac{(w_x - w_w)}{w_x} \cdot \left(1 + \frac{nM_w}{M_g}\right) \cdot 100 \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 w_x は任意の時間における試料の質量、 w_w は 7 日間の貯蔵後に室温で試料を全て分解させた後に残った水溶液(メタンハイドレート結晶を構成する水、メタンハイドレート結晶に付着した水、NaCl の合計)の質量、 M_g はメタンの分子量 16、 n はメタンハイドレートを形成する際にメタンガス 1 mol を包接するために必要な水の物質質量 6.05¹⁶⁾(水和数)、 M_w は水の分子量 18 である。

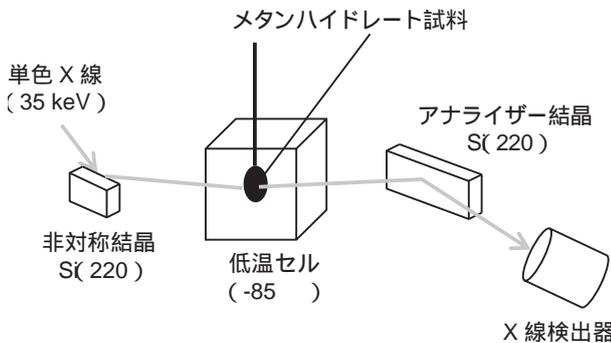


図5 位相 X 線 CT の屈折法の計測システム
Phase Contrast X-ray CT using Diffraction Enhanced Imaging System

2.3 位相 X 線 CT

メタンハイドレート塊の断層像は図5に示す位相 X 線 CT の屈折法の計測システムを用いて取得した¹⁷⁾。2.2 節に従って貯蔵したメタンハイドレート塊を、- 150 未満の窒素ガス雰囲気中で 5 ~ 10 mm 程度の大きさに切り出した後、- 85 の酢酸メチル液を満たした低温セルに入れ、35 keV の単色 X 線で測定を行った(高エネルギー加速器研究機構フotonファクトリー, ビームライン 14C)。本手法の密度分解能は 0.01 g/cm³ であるため、メタンハイドレートと氷の識別が可能である¹⁸⁾。また、空間分解能は 0.04 mm である¹⁸⁾。

2.4 走査電子顕微鏡観察

試料の微細構造を、より高い空間分解能で観察するため、走査電子顕微鏡観察(JSM-6301F, 日本電子株式会社製)を行った。- 150 未満の窒素ガス雰囲気中で 1 ~ 2 mm 程度に試料を砕き、走査電子顕微鏡観察装置に付属した前室に入れ、- 140 未満、約 0.1 Pa の低真空で試料を切断して断面を露出させた。露出した断面に同じ温度、真空度にて加速電圧 3 kV で電子ビームを照射して、断面画像を取得した。

3. 結果と考察

3.1 メタンハイドレート塊中の NaCl 濃度

本報では、質量分率 0.03, 0.10 の NaCl 水溶液を原料水としてメタンハイドレート塊を製作した。これらのメタンハイドレート塊試料を順に試料 A, B とすると、電気伝導率に基づく NaCl 濃度測定より、試料 A 及び試料 B の NaCl 質量分率はそれぞれ 0.005 と 0.027 であった(表1)。NaCl 水溶液を原料水としてメタンハイドレートを生成すると、メタンハイドレートは不純物である NaCl を排出しながら結晶になるため、メタンハイドレートスラリー生成反応器では、メタンハイドレート化していない原料水の NaCl 濃度が上昇し、反応器内の水は濃縮した NaCl 水溶液になる(図6)。

表1 原料水中の NaCl 濃度とメタンハイドレート塊中の NaCl 濃度の関係
Relation between NaCl Concentration in Water and Methane Hydrate Mass

試料名称	試料製作前の水溶液中の NaCl 質量分率	ハイドレート塊中の NaCl 質量分率
A	0.03	0.005
B	0.10	0.027

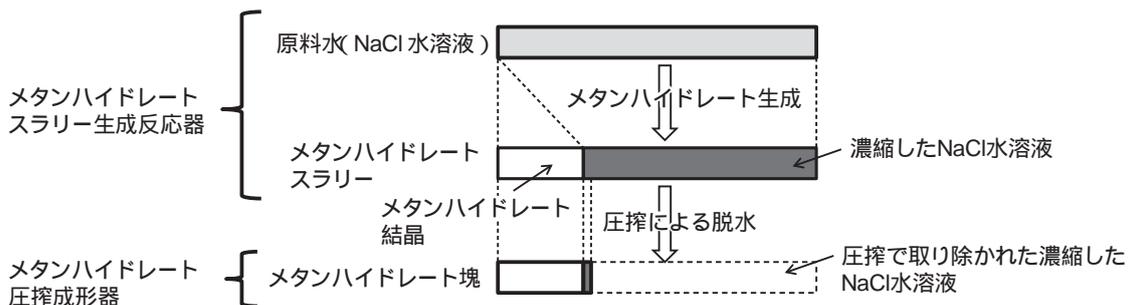


図6 メタンハイドレート塊の製造に伴う NaCl 濃度変化の模式図
Image of NaCl Concentration Variation during Methane Hydrate Mass Formation

一方で、メタンハイドレート圧搾成形器では、濃縮したNaCl水溶液が圧搾により取り除かれるため、メタンハイドレート塊の試料当たりのNaCl濃度は低下する。そのため、本章の冒頭に記述したように、製造したメタンハイドレート塊のNaCl濃度は原料水に比べ低下した。

3.2 NaClを含むメタンハイドレート塊の貯蔵中の分解

図7に-20での貯蔵時間に対するハイドレート率変化を示す。試料Aの初期ハイドレート率は84%、試料Bは82%で同等の値であった。7日間の貯蔵によって、試料Aのハイドレート率は80%前後となり、ハイドレート率の低下は5%程度に留まったが、試料Bは7日間で10%未満にまでハイドレート率が低下し、試料中のNaCl濃度によって大きく異なる結果となった。なお、参考値として同図中に示したNaCl無添加のメタンハイドレート(以下、無添加メタンハイドレート)試料の初期ハイドレート率は86%であった。また、無添加メタンハイドレートでは既往の研究で知られているとおり自己保存現象⁵⁾⁶⁾によって分解が抑制され、貯蔵7日以上が経過してもハイドレート率は84%であった。

3.3 NaClを含むメタンハイドレート塊の分解過程の断層像

NaClを含むメタンハイドレートの製造直後及び貯蔵7日後の断層像を図8、図9に示す。この図では、メタンハイドレート塊は青色から白色のグラデーションを呈しており、水色から白色に見える部位はメタンハイドレートよりも低密度

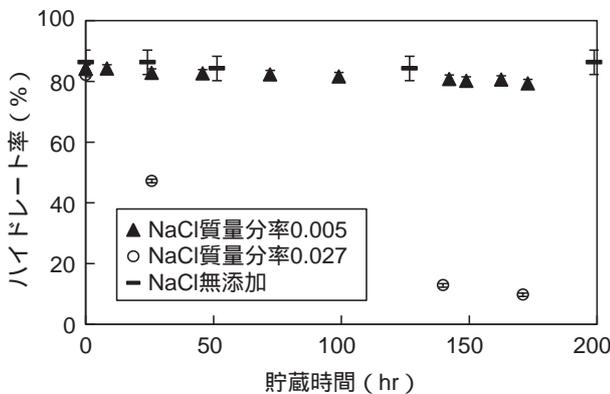
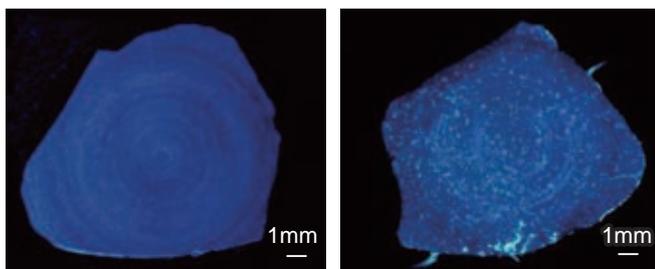


図7 メタンハイドレートの分解挙動(試料径10~20mm)
Dissociation Behavior of Methane Hydrate(10-20 mm Samples)

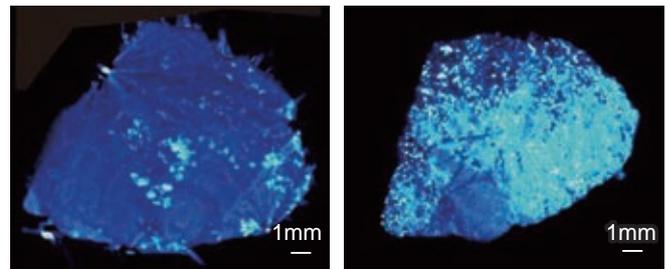


(a)製造直後 (b)貯蔵7日後

図8 NaClの質量分率0.005のメタンハイドレート塊の断層像
Cross Section Images of Methane Hydrate Mass Containing Mass Fraction of 0.005 NaCl
(a)Just after Formation,(b)after 7 Days Storage.

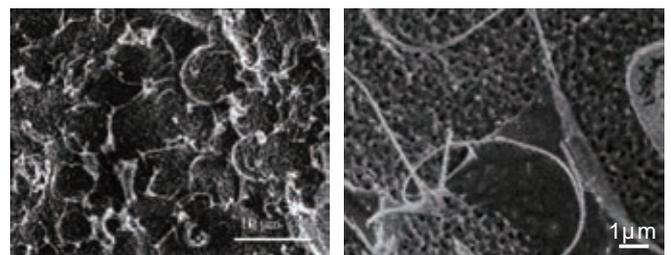
の物質である氷や気泡が混在する部位である。試料中の氷の増加はメタンハイドレートの分解が進行したことを示すため、水色から白色で表示された部分の分布の変化はメタンハイドレートの分解過程の指標となる。

製造直後の試料Aの内部には本手法の空間分解能の範囲ではメタンハイドレート以外の物質は確認されなかったが(図8(a)), -20で7日間が経過すると、試料内部のあらゆる場所に氷が点状に出現した(図8(b))。なお、試料の輪郭に沿って部分的に見られた氷は、元々の試料表面の氷膜が、試料加工後から測定開始までの間に偶然生じたものである。試料Bは、製造直後から既に試料内部に氷が点在し(図9(a)), 7日後には氷の分布は試料全体に広がった(図9(b))。すなわち試料A及び試料Bは7日間の貯蔵によって、共に内部からも分解していることが分かった。これまでメタンハイドレートの分解は、メタンハイドレート試料の最表面(メタンハイドレートと気相の界面)から進行する現象が報告されているが¹⁸⁾、試料A及び試料Bについては、メ

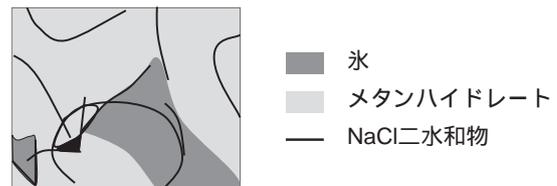


(a)製造直後 (b)貯蔵7日後

図9 NaClの質量分率0.027のメタンハイドレート塊の断層像
Cross Section Images of Methane Hydrate Mass Containing Mass Fraction of 0.027 NaCl
(a)Just after Formation,(b)after 7 Days Storage



(a)径10 μm程度の棒状構造の分布 (b)棒状構造の拡大写真((a)と同一試料中の異なる領域)



(c)(b)の簡易模式図

図10 NaClを含有するメタンハイドレートの微細構造
Microscopic Structures of Methane Hydrate including NaCl
(a)Distribution of approximately 10 μm Rims,(b)Enlarged Image of Rims(Another Site of(a)),(c)Simplified Shape of(b)

タンハイドレート塊の内部からも分解が進行することが明らかになった。なお、試料 A については、7 日間の貯蔵によるハイドレート率の低下は 5 % 程度であったが、断層像の評価からも実際に分解が進行していることを確認できた。

3.4 NaCl を含むメタンハイドレートの微細構造

試料 A の断面の微細構造を図 10 に示す。断面全体に径 10 μm 程度の棒状の構造物が広がっており(図 10 (a)), その内外はメタンハイドレートの存在を示す構造であるサブミクロンサイズの凹みが分布していた¹⁹⁾。また、場所によっては棒状物質とメタンハイドレートの間を埋めるように氷が存在することが確認された(図 10 (b), 10 (c))。同様の棒状構造は、海洋から採取したメタンハイドレート試料からも報告されており、元素分析から NaCl を含む物質であると特定されている²⁰⁾。なお、図 10 で見られた棒状構造は、粉末 X 線回折によって NaCl 二水和物であると特定されているが、ここでは詳細は省略する²¹⁾。

4. メタンハイドレート塊の自己保存現象への NaCl の影響

NaCl 水溶液は、NaCl 濃度の上昇に伴って凝固点が低下し、NaCl 質量分率 0.233、温度 - 21 で氷と NaCl 二水和物の共晶となる(図 11)²²⁾。すなわち共晶点温度である - 21 よりも高い温度では、NaCl 水溶液の一部は液体のまま存在する。したがって、- 20、大気圧の下で貯蔵している NaCl を含むメタンハイドレート塊の内部には、メタンハイドレート結晶粒界に濃集した NaCl の分布に沿って NaCl 水溶液が存在していると考えられる。ここで、メタンハイドレート塊の NaCl 質量分率を C_s とすると、メタンハイドレート塊に含まれる NaCl の質量 w_s は

$$w_s = C_s \cdot w_w \dots\dots\dots(2)$$

となる。仮に、メタンハイドレート塊中に存在する NaCl 水溶液の濃度 C_e を質量分率 0.233 とすると、水溶液中の水の質量 w_e は

$$w_e = \frac{(1 - C_e)}{C_e} \cdot w_s \dots\dots\dots(3)$$

となり、メタンハイドレート塊中に存在する NaCl 水溶液の質量比率 C_{aq} は、メタンハイドレート塊の質量を w_0 とすると

$$C_{aq} = \frac{(w_s + w_e)}{w_0} \dots\dots\dots(4)$$

と表される。

w_w と w_0 の実測値を用いて式(2)~(4)の計算をすると、 $C_s=0.005$ の NaCl を含むメタンハイドレートには、試料質量のうち質量分率 0.02 の水溶液が、 $C_s=0.027$ の NaCl を含むメタンハイドレートには 0.11 前後の水溶液が存在することになる。これらの NaCl 水溶液に隣接するメタンハイドレート結晶は氷膜を形成することができないため、図 8 及び図 9 のように試料内部から点状に分解が進行し、少なくとも試料 B では自己保存現象の発現が大きく抑制されたと推察される。

5. おわりに

メタンハイドレートの自己保存現象に関する基礎的検討として、質量分率 0.027 までの NaCl を含むメタンハイドレート塊の分解過程を観察した。その結果、NaCl を高濃度に含むメタンハイドレート塊は - 20、大気圧の下では、メタンハイドレート結晶粒界の NaCl 濃集部が NaCl 水溶液となるために、自己保存するための氷膜が形成されず、NaCl 無添加のものに比べて分解が促進することが分かった。また、その分解は試料内部に広く分布する NaCl 濃集部から進行していることが示され、高濃度に NaCl を含むメタンハイドレート塊の - 20、大気圧の下での分解過程が明らかになった。

最後に、位相 X 線 CT の実施に当たり、米山明男氏(株式会社日立製作所)、竹谷敏氏(国立研究開発法人産業技術総合研究所)、兵藤一行准教授(大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構)、武田徹教授(学校法人北里研究所北里大学)にご協力いただいたことを報告する。また、竹谷敏氏には走査電子顕微鏡観察の実施にもご協力いただいた。結果の解釈に当たっては、内田努准教授(国立大学法人北海道大学)にご議論いただいた。ここに感謝の意を表す。

なお、本研究における位相 X 線 CT は、高エネルギー加速器研究機構の課題番号 2015C311 の下で行ったものである。

参考文献

- 1) E. D. Sloan Jr.: Clathrate Hydrates of Natural Gases, 2nd Ed., Marcel Dekker, Inc., 1998, p. 602
- 2) 松本・外: 日本海東縁、上越海盆の高メタンフラックス域におけるメタンハイドレートの成長と崩壊, 地学雑誌 118, 1(2009), p. 43
- 3) K. Yamamoto: Overview and introduction: Pressure core-sampling and analyses in the 2012–2013 MH21

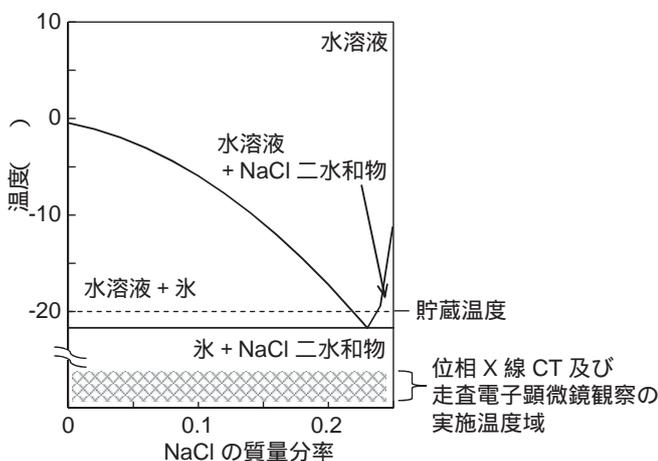


図 11 水と NaCl の相図
Phase Diagram of H₂O-NaCl System

- offshore test of gas production from methane hydrates in the eastern Nankai Trough, *Marine and Petroleum Geology*, 66, 2 (2015), p. 296
- 4) S. R. Dallimore, et al.: Summary and implications of the Mallik 2002 Gas Hydrate Production Research Well Program, in *Scientific Results from the Mallik 2002 Gas Hydrate Production Research Well Program*, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada, *Bull. Geol. Surv. Can.* 585 (2005), p. 1
- 5) V. S. Yakushev, et al.: Gas-Hydrates Self-Preservation Effect. In *Physics and Chemistry of Ice*, Hokkaido University Press, 1992, p. 136
- 6) L. A. Stern, et al.: Anomalous Preservation of Pure Methane Hydrate at 1 atm. *The Journal of Physical Chemistry B*, 105, 9 (2001), p. 1756
- 7) W. F. Kuhs, et al.: Ice Perfection and Onset of Anomalous Preservation of Gas Hydrates, *Physical Chemistry Chemical Physics*, 6 (2004), p. 4917
- 8) T. Uchida, et al.: Dissociation Termination of Methane-Ethane Hydrates in Temperature-Ramping Tests at Atmospheric Pressure below the Melting Point of Ice, *Chem Phys Chem*, 12, 9 (2011), p. 1652
- 9) S. Takeya, et al.: Dissociation Behavior of Clathrate Hydrates to Ice and Dependence on Guest Molecules. *Angewandte Chemie International Edition*, 47, 7 (2008), p. 1276
- 10) G. Zhang, et al.: Ultra-Stability of Gas Hydrates at 1 atm and 268.2 K, *Chemical Engineering Science*, 63, 8 (2008), p. 2066
- 11) H. Sato, et al.: Preservation of Methane Hydrates prepared from Dilute Electrolyte Solutions, *International Journal of Chemical Engineering*, 2009, ID 843274
- 12) H. Sato, et al.: Self-preservation of Methane Hydrate Revealed Immediately below the Eutectic Temperature of the Mother Electrolyte Solution, *Chemical Engineering Science*, 91 (2013), p. 86
- 13) T. Takaoki, et al.: Study of Natural Gas Hydrate (NGH) Carriers, *Proceedings of 5th International Conference on Natural Gas Hydrates*, Trondheim, 2005, 4021
- 14) 岩崎 . 外 : 天然ガスハイドレートペレットの自己保存性に関する研究 , *三井造船技報* , 187 (2006-2) , p.15
- 15) V. P. Melnikov, et al.: Evidence of liquid water formation during methane hydrates dissociation below the ice point, *Chem. Eng. Sci.*, 64 (2009), p. 1160
- 16) J. A. Ripmeester, et al.: Low-temperature cross-polarization/magic angle spinning carbon-13 NMR of solid methane hydrates: structure, cage occupancy, and hydration number, *The Journal of Physical Chemistry*, 92 (1988), p. 337
- 17) A. Yoneyama, et al.: Quantitative comparison of imaging performance of x-ray interferometric imaging and diffraction enhanced imaging, *Medical Physics*, 35, 10 (2008), p. 4724
- 18) S. Takeya, et al.: Non-destructive Imaging of Anomally Preserved Methane Clathrate Hydrate by Phase Contrast X-ray Imaging, *Journal of Physical Chemistry C*, 115, 32 (2011), p. 16193
- 19) W. F. Kuhs, et al.: The Impact of Porous Microstructures of Gas Hydrates on Their Macroscopic Properties, *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 14, 4 (2004), p. 305
- 20) L. A. Stern, et al.: Grain-Scale Imaging and Compositional Characterization of Cryo-Preserved India NGHP 01 Gas-Hydrate-Bearing Cores, *Marine and Petroleum Geology*, 58 (2014), p. 206
- 21) H. Mimachi, et al.: Dissociation behaviors of methane hydrate formed from NaCl solutions, *Fluid Phase Equilibria*, 413 (2016), p. 22
- 22) J. Timmermans: *The Physico-Chemical Constants of Binary Systems in Concentrated Solutions VOL.3*, Interscience Publishers, Inc., New York 1960, p. 308

[問い合わせ先]

技術開発本部 技術開発センター
TEL 0863 - 23 - 3101 三町 博子



三町 博子



村山 哲郎

沿岸型波力発電装置の開発(第2報)

- 大洗港で実証試験を完遂 -

中野 訓雄* 前村 敏彦* 宮島 省吾** 川口 隆***

Development of Coastal Wave Power Generation Device(Part2)

- First Report of Demonstration Test at Oarai Port -

Kunio NAKANO, Toshihiko MAEMURA, Shogo MIYAJIMA, Takashi KAWAGUCHI

Many R&D projects are now carried out using ocean energy around Japanese islands to cope with global greenhouse emission. Mitsui Engineering & Shipbuilding Co., Ltd. (MES) has also been developing various technologies in this field through experimental and theoretical approaches. Results of such approaches of ours have proved that coastal wave power generation using resonance control is a promising way to utilize ocean energy as wave power.

MES was awarded "Technical Development and Demonstration of Small, Efficient Wave-Power Device" by the Ministry of Environment in fiscal year 2013 (October, 2013), and had been developing wave-power generation device aiming for a full-scale demonstration test at sea within fiscal year 2015. The results of such approaches have confirmed the effectiveness of the point absorber effect at actual sea utilizing resonance control: the most effective method to recover wave energy.

This report focuses on the demonstration test at actual sea, as a secondary report on the development for the coastal wave power generation device.

地球温暖化防止対策として、再生可能エネルギーの活用が期待されており、海洋に囲まれている我が国では、海洋エネルギー利用の実現化に向けた技術開発が各方面で進められている。三井造船は、水槽試験による実験的研究と理論的な研究を組み合わせ、この分野の研究開発に長年取り組んできた。その結果、同調制御を用いた沿岸型波力発電が海洋エネルギー利用の有望な手段となることを示した。

その成果を実証するため、平成25年度(平成25年10月)に環境省地球環境局から「小型で高効率な波力発電システムに関わる技術開発・実証事業」を受託し、平成27年度中の本格的な実証試験を目指して開発を進めてきた。この結果、波のエネルギーを最も効率良く回収する同調制御を用いることで、実海域において一次変換効率が100%を越えるともいわれる点吸収機理論効果を観測することができた。本報では、沿岸型波力発電装置の開発状況を第2報として、実海域での実証試験を中心に報告する。



写真1 沿岸型波力発電の試験装置

Demonstration Device for Coastal Wave Power Generation

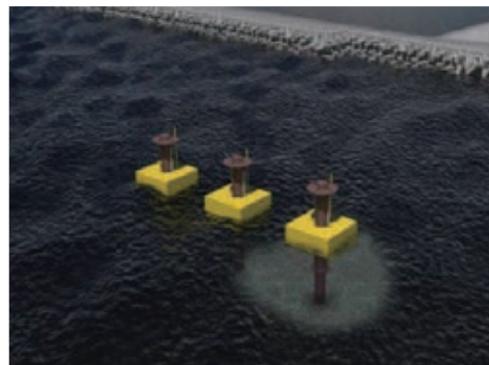


図1 沿岸型波力発電所の将来設置イメージ

Future Image of Coastal Wave Power Generation

* 技術開発本部 技術総括部 再生可能エネルギープロジェクトグループ

** 株式会社三井造船昭島研究所

*** 株式会社アクシス

1. はじめに

海洋エネルギーの開発は海洋立国としての我が国の主要課題である。平成19年、我が国における海洋政策を総合的かつ戦略的に推進していくことを目的とした海洋基本法が成立し、これに基づき、平成20年には海洋基本計画が閣議決定され、集中的に実施すべき海洋政策が整理された。この中で海洋再生可能エネルギーは海洋資源の一つとして位置付けられ、その効率性、経済性向上のための取り組みの重要性が指摘されている。しかし、これまで我が国固有の海洋エネルギー、特に波力発電の分野で事業化された例はなく、港湾・離島においても活用可能な電源として波力発電の技術開発が求められている。したがって、我が国の海域・沿岸において実用可能な波力発電技術を開発し、実用化を推進することの意義は大きい。

波力発電は、1940年代、世界に先駆けた益田の研究の後、1970年代から日本では三井造船も参画して、空気タービン式振動水柱(OWC)型波力発電装置の研究が盛んに行われた。一方、海外では可動物体型波力発電装置の研究が行われ、Salter による有名な Salter's duck の研究¹⁾が行われた。Salter とほぼ時を同じくして、3人の研究者が、点吸収機理論²⁾を導いた。

このような状況において、当社は造波装置で培った制御技術を応用して新たな波力発電装置を開発した³⁾。当社が開発した沿岸型波力発電装置は、海底に打ち込んだ杭にフロートを通して、上下する波にフロートを同期させ、波パワーを電力に変換するシステムである(写真1)。沿岸部の波パワーは沖合に比べて小さいが、電力を使用する陸上までの距離が短く、装置の設置も容易で発電機構も単純なため、その利用価値は高いと考えられる。本装置の利用先は種々考えられるが、外洋に面した港に複数基設置することにより大きな電力を供給するとともに、波パワーを吸収することにより船舶の入出港時における波浪による影響を軽減させる効果も期待できる(図1)。

沿岸域における固定式の波力発電装置の開発は2011年度から開始した。2012年度は、小型模型を用いた造波機による水槽実験等を実施し、フロートの運動をコントロールする同調制御により波のエネルギーを効率的に吸収し、従来と



図2 実証試験の全体工程
Schedule of Demonstration Experiment

比べて効率良く電力に変換できることを原理的に実証した。2013年度には、環境省委託事業であるCO₂排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業再生可能エネルギー・自立分散型エネルギー低炭素化技術開発分野のうち、「小型で高効率な波力発電システムに関する技術開発・実証事業(副題:大洗港における実証)」として採択され、実証試験装置を2014年度に製造し、2015年度に実証試験を実施した。

2. 実証試験の概要

2.1 目的

茨城県大洗町にある大洗港をフィールドとして、波力発電装置を設置し、沿岸地域での利活用を想定した発電技術の開発・実証を行う。実証機は1基とし、大洗港にて平均出力8kW程度の出力が得られる発電装置を設置することとした。水槽で実施した基本性能を、実海域で実証し、耐久性、環境性ととともに、経済性の評価検討を行う。あわせて、当該波力発電装置の沿岸域での施工に関わる技術的検討、海洋環境に与える影響評価を行う。実証機で得られた電力は、蓄電池等により平滑化し、港湾内の実負荷に電力を供給する。

2.2 全体工程

実証試験の全体工程を、図2に示す。現地調査開始から詳細設計まで約1年間で行い、試験装置を約半年で製作し、大洗港での試験を約1年間行った。全体の事業期間は実質的に約2年間で完了した。

2.3 実証試験装置の構成

製作した実証試験装置本体の仕様を表1に、各部の説明を図3に示す。本装置は、波によるフロートの動揺によるエネルギーをフロート内に設置した発電機により電力に変換する。装置本体の設置場所を写真2、設置状況を写真1に示す。

装置本体で得られた電力は、陸上に送電し、蓄電装置で平滑化した後、大洗港内に設置されている海水汲み上げポンプに供給する。試験装置の全体システム構成を図4に、制御設備及び汲み上げポンプを写真3に示す。

表1 実証試験装置の仕様
Specifications of Demonstration Device

発電所名称	大洗港波力発電実証試験機	
形式	機械式	
発電所の位置	茨城県東茨城郡大洗町磯浜町	
発電所の出力	20 kW	
周波数	50 Hz	
発電機 本体	種類	永久磁石式同期発電機
	台数	2
	容量	10 kVA
水深	6.5 m	
係留杭長	11 m	
設置方式	着底式(ブロック方式)	
フロート	幅	2.5 m
	奥行き	3.2 m
	高さ	3 m
動力伝達機構	ラック・アンド・ピニオン	

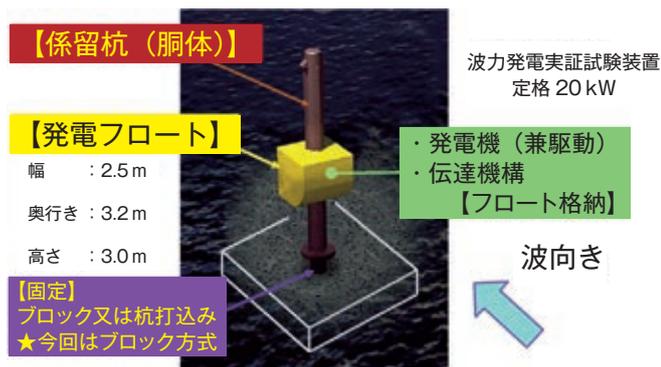


図3 実証機の構造
Structure of Demonstration Device

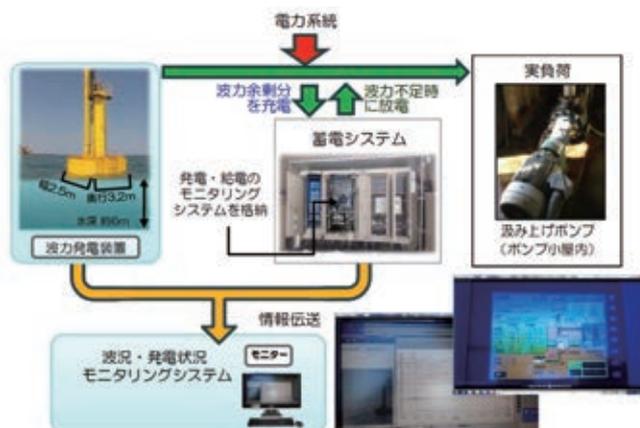


図4 波力発電装置の全体システム構成
Outline of Electricity Supply Control System



写真2 設置場所(大洗港)
Installation Location(Oarai port)

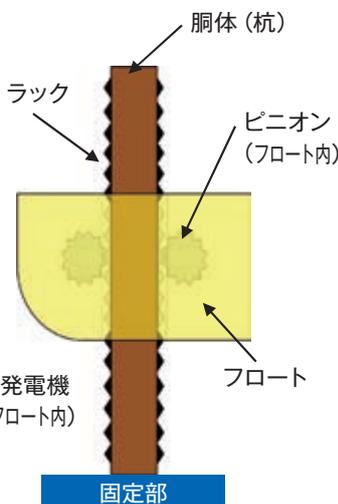


図5 波力発電装置の動力伝達概念
Power-transmitting Mechanism of Power Generator



写真3 設備(左: 汲み上げポンプ, 右: 新設の制御盤)
Testing Facility on land(Left: Pump, Right: Controlling Panel)

2.4 発電装置の特長

本波力発電装置は、波による発電フロートの上下運動を回転運動に変換し、発電機を回すことで波パワーを電力に変換する。フロートの上下運動の動力伝達概念を図5に示す。このとき、“同調制御”という当社独自の制御技術を活用することで、高い発電効率を実現させた。実海域における波は、様々な周期で到来する。これに対応して最も効率的に発電する方法が、同調制御を用いる方法である。

一方、水深が浅い沿岸域に設置するため、発電装置本体や海底ケーブル等の現地施工については比較的容易になる。メンテナンス性についても同様であり、インフラ等が整備され

た港湾等に設置することで多くのメリットが存在する。さらに、外洋に面した防波堤の外側、すなわち、厳しい外洋に設置することを想定し、台風等の荒天時に発電フロートを沈降させる保護システムを保有していることも大きな特長である。

3. 大洗港における実証試験

実証試験は、写真2に示す茨城県大洗町の大洗港で実施した。発電設備の設置場所は、外洋に面した防波堤の外側である。

本実証試験では、実負荷(大洗町漁業協同組合所有の汲み上げポンプ、写真3の左側を参照)への電力供給システムの検証とともに、実証機においても、高い発電効率が示せることも大きな目的になっている。具体的には、波高1m程度、周期6~7秒付近の波に対して、同調制御を用いて40%以上の発電効率を達成することを目標としている。なお3mを超える大きな波に対しては、発電フロートを沈降させ、装置全体が受ける外力を減らすことで装置全体を守るシステム(荒天時フロート沈降システム)を動作させる。

4. 実証試験結果

4.1 発電装置の性能

波力発電装置設置場所の海面の水位は、固定部に設置した圧力センサにより求めている。フロート(発電フロートとも呼ぶ)の位置はピニオン軸の回転数から求めている。これらの計測例を図6に示す。本報では、観測結果の典型例を観測時の波周期(T)と波高(H)に注目して示す。このときの、波周期(T)は、観測時におけるある時間帯に観測した水位を正弦波で近似して求めたものであり、波高(H)はその時の平均水位を挟んだ最大値と最小値の差を平均したものと定義している。

4.1.1 フロートの固有周期

フロートを制御せず、フリーの状態では波とフロートの上下動を計測し、図7に示す周波数応答特性が得られた。これよりフロートの固有周期は約4秒で、振幅倍率は約2.8となっていることが分かる。

4.1.2 同調制御試験

外洋波の波周期のほとんどは、6秒から12秒程度であり、フロートの上下動固有周期より長い場合、自然な状態で共振が起きることは少ない。ここで、フロートの振動周期を波周期より位相を $\pi/2$ 遅らせることにより、波のエネルギーを最大に吸収することができる。これを同調制御と呼び、発電出力の増加を図っている。

ただし、固有周期に近い短周期の波が来た場合、フロート

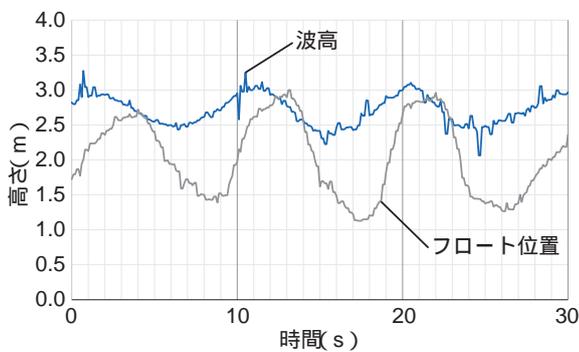


図6 観測水位とフロート位置の計測例
Typical Measured Log of Wave Height and Float Position

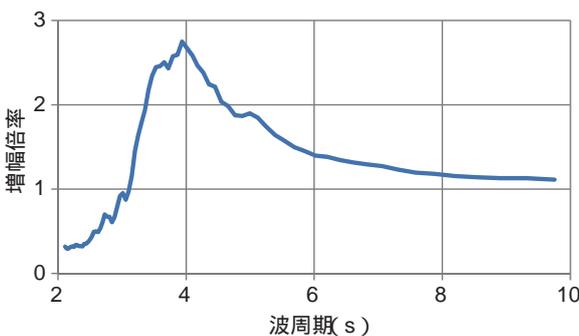


図7 フロートの周波数応答 振幅特性
Frequency Response and Amplitude Characteristic of Float

を大きく揺らすことがある。図8はその事例である。入射波が $T=4.2$ s, $H=0.5$ m の状況であり、フロート固有周期約4 s に近い周期を有する成分波の割合が大きかったため、同調制御運転を行わなくともフロートが波に共振して大きく上下し、約10秒の短い間に10 kWの定格出力を持つ第1発電機の最大出力が6 kW近くまで発電したことが分かる。なお、この発電出力は、発電機のトルクと回転角速度を乗じて得たものであり、発電は、フロートの上昇と下降の両方の区間で行われるので、発電出力のピーク間周期は約2 sである。この例のように、同調制御運転を行わない場合は、発電機の力行(駆動)が無いので、発電出力がマイナスの値を示すことはない。

次に、入射波の波周期がフロート固有周期よりも長い場合に同調制御運転を行った結果を示す。

図9は $T=10$ s, $H=0.75$ m の結果であり、図10は $T=15$ s, $H=0.50$ m の結果である。このとき、発電出力がマイナスの値を示す場合があるのは、同調制御運転では、発電機が力行(駆動)でパワーを消費している時間があるためである。フロート上下の固有周期に比べて、波周期が長くなると、同調制御による共振現象発生に大きなパワーが必要となることが負の出力値が得られていることに表されている。

4.1.3 一次変換効率(発電効率)

フロートの幅 B (m) に入射する波高 H_w (m)、波周期 T_w (s)

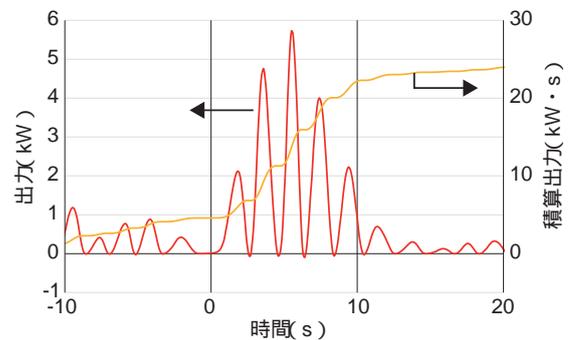


図8 固有周期近傍の波浪下における発電特性
(同調制御無し: $T: 4.2$ s, $H: 0.5$ m)
Generated Power Characteristics around Natural Period
(without Resonance Control: $T: 4.2$ s, $H: 0.5$ m)

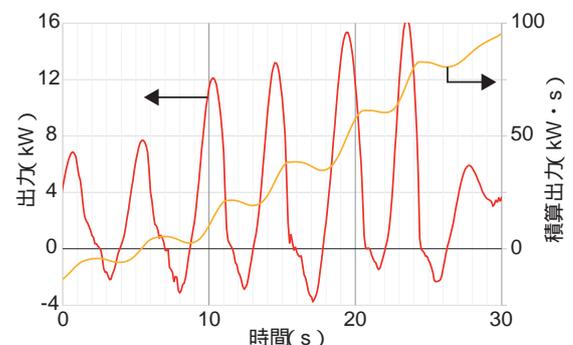


図9 2倍の固有周期近傍の波浪下における発電特性
(同調制御有り: $T: 10$ s, $H: 0.75$ m)
Generated Power Characteristics around Double Natural Period
(with Resonance Control: $T: 10$ s, $H: 0.75$ m)

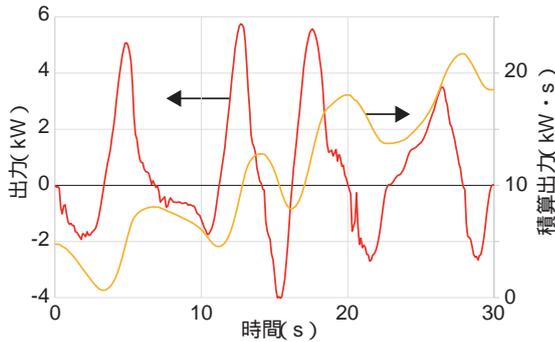


図 10 3 倍の固有周期近傍の波浪下における発電特性 (同調制御有り: $T: 15\text{ s}$, $H: 0.50\text{ m}$)

Generated Power Characteristics around Triple Natural Period (with Resonance Control: $T: 15\text{ s}$, $H: 0.5\text{ m}$)

の規則波の波パワー P_w (kW) は, (1) 式で算出される.

$$P_w = H_w^2 T_w B \dots\dots\dots (1)$$

フロートによる一次変換パワー P_1 は, 発電機の負荷トルク T_G に回転角速度 を乗じた値を一定時間 (T) で積分することにより, (2) 式で算出される.

$$P_1 = \frac{1}{T} \int_0^T \{T_G(t) (t)\} dt \dots\dots\dots (2)$$

一次変換効率 η_1 は, (2) 式の一次変換パワーを, (1) 式のフロート幅 B に入射する規則波の波パワーで除することにより, (3) 式で算出される.

$$\eta_1 = \frac{P_1}{P_w} \dots\dots\dots (3)$$

なお, 発電効率は, 一次変換効率に発電機の損失等を考慮した発電機効率 (二次変換効率) を乗ずることにより算出される.

主要な実証試験結果の波パワー, 一次変換パワー, 一次変換効率を整理して, 表 2 に示す. $T=4.2\text{ s}$ の値は, フロート上下動の固有周期 (Natural period; N.P.) の値であり, 同調制御運転は行っていない. 図 8 ~ 図 10 を代表例とする結果は, 不規則波中の結果であり, 一般に, 不規則波の波パワーは, 観測した波高と有義波周期を用いて求める規則波換算波パワーの約半分である. しかしながら, 評価時間が 30 s という短い時間であり, 取得できる波数も少ないので, 入射波パワーは, 不規則波ではなく, 観測で得られた波高 (H) と波周期 (T) を用いた規則波換算の波パワーとして算出した.

図 11 に, 実証試験で得られた波周期と一次変換効率の関係を示す. このとき, 波高が 1 m を超えたデータ (波高 1.4 m) のデータは除外した.

波高が 0.5 m ~ 0.8 m 程度の場合, 波周期が固有周期に近く, 同調制御運転をしなくても共振現象を示した波周期 4.2 s の波において, 一次変換効率は約 150% であった. 点吸収機理論によれば一次変換効率は 100% を越えると言われており, 試験結果はこの効果が現れたものと考えている.

表 2 実証試験結果
Results of the Demonstration Tests

T (s)	4.2	10.0	10.0	10.0	14.0	15.0
H (m)	0.50	0.55	0.75	1.40	0.70	0.50
P_w (kW)	2.6	7.6	14	49	17	9.4
P_1 (kW)	4	4.7	10	12	1.6	1.3
η_1 (%)	152	62	71	24	9	13
制御条件	N.P.	同調制御				

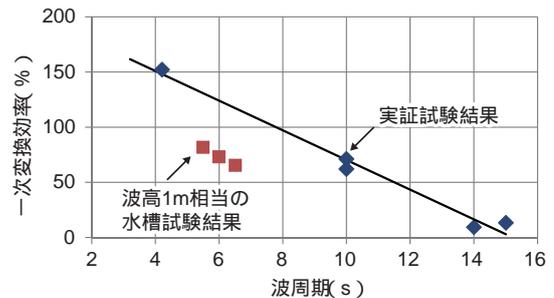


図 11 波周期と一次変換効率
Wave Period and Primary Conversion Ratio

本機の場合, 波周期が 8 s 前後まで 100% を越える一次変換効率が期待できる. しかし, 同調制御運転に力行パワーが必要な長周期になるに従い単調減少し, 波周期 10 s で 60 ~ 70%, 15 s で 10% 程度まで低下した.

実証試験において, 同調制御運転が安全に実施できる波高 1 m 未満の波は, 波周期 10 s 以上の場合がほとんどであった. 一方, 2013 年度に実証試験装置の 1/5 スケールの模型を用いて, 同調制御の性能確認水槽試験を行ったときの実機波高 1 m, 実機波周期 5.5 s, 6.0 s, 6.5 s の規則波で実施した水槽試験結果を図 11 に合わせて示した.

水槽試験は波高 1 m 相当の結果であり, 実証試験時に比べて入射波高が大きいため, 共振現象を絞った同調制御運転をした結果, 一次変換効率は若干低下していると考えられる. また, 試験範囲が狭いため, 一次変換効率は波周期に対して単調減少しているとは断言できないが, 実証試験装置の同調制御運転結果とほぼ等しい結果を示していると考えられる.

一般的に, 抵抗制御運転では, 一次変換効率はフロートの固有周期に近い波周期で高いが, 波周期が固有周期より長くなるにつれて急激に減少してしまう. 一方, 同調制御運転では, 長い波周期に対する一次変換効率の減少が緩やかであり, この効果が年間発電量の向上に寄与すると考えられる.

波周期 14 s 以上で, 同調制御による出力が急激に低下しているのは, 発電機の駆動パワー不足 (トルク不足) や, フロート容積の限界 (Budal の第二の上限定理⁴⁾) によるものと思われる.

4.1.4 他の制御との違い

同調制御運転は, 高効率であるが, 大波高では共振振幅が過大になり, フロートのストローク上下限への衝突, 発電機の過回転等の危険がある. そのような場合には, 発電機を回生装置としてのみ使用して発電する抵抗制御運転が使用され

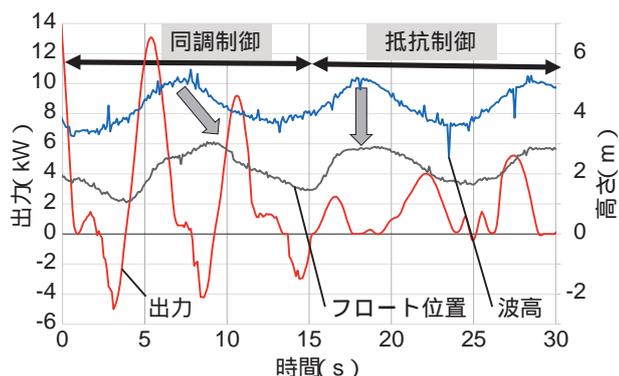


図 12 同調制御と抵抗制御の違い

Difference between Resonance Control and Resistance Control

る。同調制御運転と抵抗制御運転の切り替えは、制御係数を変更するだけなので、瞬時に行うことができ、装置を停止させる必要はない。

図 12 は、前半 15 s は同調制御運転、後半 15 s は抵抗制御運転を実施した結果である。発電出力がプラスを示す場合が回生(発電)運転であり、マイナスを示す場合が力行(駆動)運転である。同調制御では、発電出力の線がマイナスになる部分があり、力行(駆動)運転が含まれることがわかる。この結果、図中の矢印で示すように、波に対してフロートの位相が“ $\frac{1}{2}$ ”だけ遅れ、共振が引き起こされている。これに対し、抵抗制御では、発電 kW がマイナスになることがなく、フロートの位相も波に対して遅れることはないが、共振させていないため、発電量は小さい。

4.2 システムの有効性

実証試験においては、波力電力を実負荷に供給するための電力供給制御システムと、台風等の荒天時にフロートを沈降(避難)させるシステムについて検討した。

4.2.1 電力供給制御システム

電力供給制御システムは、発電機本体を制御するシステム並びに電力変換システム、蓄電池システム及び電源切り替えシステムにより構成されている。また、波力発電装置の稼働状況は、現場に設置したモニタリングカメラを通じ、遠隔にあるモニターでも確認できるようモニタリングシステムを構築した。本システムと発電設備との関係を図 4 に示す。

実証設備で発電した電力は、実負荷へ電力を供給する波力発電の電力が不足した場合でも、蓄電池で補うことができ、それでも不足する場合は系統電力からの供給も行われる構成となっている。実負荷の稼働を最優先させるため、波力電力を供給する場合と系統電力のみを供給する場合で、切り替えができるシステムになっており、この切り替えについても正しく作動することを確認した。なお、汲み上げポンプに波力電力を供給しない場合や過大な波力電力が発生した場合なども想定しているため、制御盤内には回生抵抗器が設置されている。

4.2.2 荒天時フロート沈降システム

荒天時フロート沈降システムは、荒天時に装置全体が受ける外力を減らすことで装置全体を守るためにフロートを沈降させるものであり、波高が 3 m を超える場合に動作させるよ



写真 4 荒天時のフロート沈降状況

State of Float submerged under Adverse Weather Conditions

うに設計した。フロートを海面下に沈降させることで波からの直接的な影響を避け、フロートや係留杭などが破損しないための安全対策である。

フロート内は、発電機及び電気機器類が収納される機械室と海水を注排水するバラスト室に別れており、バラスト室に注排水する海水量で、フロートの沈降及び浮上を制御する。浮上時には、吸気口のダクトから、コンプレッサーでバラスト室に空気を送気し、海水を排出する。これらの機構の操作は、制御盤(防波堤に設置)内にあるコンピュータ(PC)又は遠隔監視用のモバイル PC にて行う。

写真 4 は 2015 年 8 月 23 日に撮影をしたもので、最大波高で 7 m を超える波浪が来襲している状況である。フロートは沈降させているため、外観上のトラブル発生は無かった。しかし、当初は機械室(フロート内部)の水密性についてはリアルタイムに確認できず、後日、静穏時にフロートを浮上させてから、内部を目視にて確認していた。8 月以降は、フロート内部にライブカメラを設置し、フロート沈降時においてもリアルタイムに映像を見て、内部の異常が無いことを確認できるような対策を施した。なお、8 月下旬から 12 月上旬までの現地試験中に台風や荒天があったが、安全性上の問題は発生しなかった。

4.3 成果と今後の課題

ここでは、実証試験における成果と今後の課題について纏めた。限られた期間の実証試験ではあったが、以下の成果を挙げたと考える。

波高 50 ~ 70 cm、波周期 5 ~ 10 秒までの波に対して、高い一次変換効率を示すことができた。発電機効率や海底ケーブル等による損失分を考慮しても、波高 1 m 程度、周期 6 ~ 7 秒付近の波に対して目標値の 40 % を上回る発電効率(フロート幅当たりに入射する波パワーを分母とする)を示すことは出来たと考える。すなわち、周期が比較的長い波であれば、小さな波でも高い発電効率を示すことが確認できた。

最大波高で 7 m を超える波浪や、連続 1 週間を超えるフロートの沈降状態(海面下に退避した状態)においても、構造体や装置に異常は生じなかった。

短期間ではあったが、波力電力を実負荷(汲み上げポン



写真5 可動ローラー
Movable Roller

ブ)に供給することができ、異常も生じなかった。電力変換システムの妥当性を確認することができた。

現地海域において長期間にわたり、発電装置を設置した状態を保ち、防食性能や構造体としての安全性などを確認できた。

一方で、今後の課題も明確になった。低コスト化や普及可能性だけでなく、実用化のための技術課題をクリアする必要がある。主な事項として以下4点について述べる。

同調制御の適用範囲を拡大する必要がある。モーター(発電機)の駆動力だけに頼らない新しい同調制御機構を確立することで、波高50～120cm、波周期5～14sの範囲にまで適用できることが考えられる。これにより波浪発生頻度のほとんどをカバーできるため、設備利用率の向上が期待できる。

波による水平力による移動を抑え、上下運動だけを保持するという重要な機能を担う可動部(特に可動ローラー(写真5)など)の耐久性の確認が必要である。本事業では各種の課題の発見等を含めて約1年の実証試験を経験できたが、連続という意味では、可動ローラーで4ヶ月が最長である。本システムの場合、フロートを杭から取り外すことができるようにメンテナンスやり替えについて配慮しているが、少なくとも構造体は最低10年、可動部は最低1年の耐久性は必要であると考えている。今回は、必要最小限のフロート平面寸法(2.5m×3.2m)としたため、部品交換がし難い状況であった。交換ができた一部の部品でも海上作業に長時間を要した。実用機の場合は、10～20年にわたって使用する製品として高いメンテナンス性は必須であることから、フロート平面サイズを5m四方程度に拡大し、交換頻度の高い部品周囲の構造見直しを含めた、メンテナンスに適した構造の開発が必要である。

本実証試験では、現状復旧を考慮して広い占有面積を有する捨石マウンド工法を選択したが、海上作業を含めた設置工事に2カ月以上の期間を要した。実用化に向けて経済性やメンテナンス性も考慮した場合、新しい設置工法の開発を含め、現地施工性の向上が必要である。

5. おわりに

茨城県大洗町にある大洗港をフィールドとして、海洋再生可能エネルギーによる波力発電を実用機の約1/2のスケールで行った三井造船が考案した同調制御を用いることにより、高い発電効率を発揮することが確認された。また、波力発電を実用化するまでに解決すべき課題も明らかになった。

陸上では、太陽光発電、風力発電などの再生可能エネルギーによる発電が事業化されている。波力発電はこれらに劣らず十分な開発の歴史があるが、まだ実用化に至っていない。この原因としては、陸上に比べ発電装置へのアクセスが容易でないこと、荒天時の波のエネルギーが破壊的であること、海水による腐食環境が厳しいことなど様々な原因が考えられる。今回開発した波力発電システムは、これらの問題に対応可能なものであり、更に研究開発を進めることにより、波力発電の実用化に貢献するものと確信している。

本報は、環境省委託事業であるCO₂排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業/再生可能エネルギー・自立分散型エネルギー低炭素化技術開発分野のうち、「小型で高効率な波力発電システムに関わる技術開発・実証事業(副題:大洗港における実証)」の成果の一部を掲載したものである。現在も、環境省地球環境局、国土交通省港湾局をはじめとする国等のご支援を頂いている。特に実証試験場所である茨城県及び大洗町並びに大洗町漁業協同組合の皆様方に絶大なご協力を頂いている。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- 1) S. H. Salter : Wave power, Nature, 249(1974), p.720
- 2) J. Falnes : Ocean Waves and Oscillating Systems, Linear Interactions Including Wave-Energy Extraction, Cambridge University Press, (2002), p.196
- 3) 中野・外 : 沿岸型波力発電装置の開発 - 大洗港で実証試験を開始 -, 三井造船技報, 215,(2015-8), p.21
- 4) J.Falnes : A review of wave-energy extraction, Marine Structures, 20, 4(2007), p.185

〔問い合わせ先〕

技術開発本部 技術総括部
TEL 03 - 3544 - 3025 中野 訓雄



中野 訓雄



前村 敏彦



宮島 省吾



川口 隆

大型風力タワー基礎の設計・施工技術

エンジニアリング事業本部 南 陽 一

Design & Construction Technology of Foundation for Large Wind Turbine Tower

Yoichi MINAMI
Engineering Hq.

1. まえがき

三井造船が建設する風力発電設備の大型風車は、ナセル、ハブ及びブレードを鋼製の円筒型タワーの頂部に設置する構造であり、このタワーはコンクリート基礎に据え付けている(図1)。国内で現在、新規に建設される大型風車の発電容量は2 MW から 3 MW 級のモデルへ移行しつつあり、タワーの高さも 60 m 程度から 80 m ~ 90 m となってきた。

タワーと基礎の結合部分に注目すると、図2に示す2種類の形式がある。一つはコンクリート基礎にタワーの最下部を埋め込む形式である。もう一つはアンカーボルトを用いる形式で、タワー底部のベースプレートタワー塔体内側と外側からコンクリート基礎に埋め込んだボルトで固定するものである。最新の3 MW クラスの海外製風車では、アンカーボルト基礎形式を採用しており、今後風車基礎形はアンカーボルト式基礎が主流となることが予想されている。このような背景の下、風車タワーと基礎の結合部の健全性・安全性を確保する目的で実用的な基礎配筋方法を考案して特許を出願し、2009年1月に『塔状構造物の基礎構造 特許第4242445号』としてアンカーボルト式風車基礎配筋に関する特許を取得した。本報では、この特許の内容を紹介する。

2. 風車のアンカーボルト式基礎の特徴

大型風車で採用するアンカーボルト形式の基礎では、通常の鉄骨建物・工作物と異なる特徴がある。それはアンカーボルト軸からコンクリートに付着力を介して荷重を伝えるのではなく、この付着力を敢えて無くしたアンボンドアンカー(Un-bond anchor)を採用している点である。風車基礎のアンカーボルト部分の拡大図は図3に示すとおりであり、付着力を無くすためにボルト軸部にポリ塩化ビニル(PVC)管等のさや管を設けボルト軸がコンクリートに接触しない構造となっている。

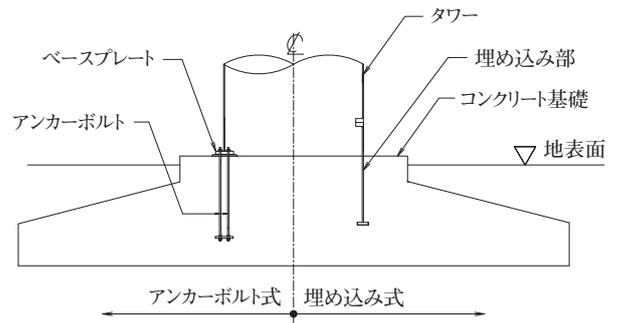


図2 基礎の形式二種

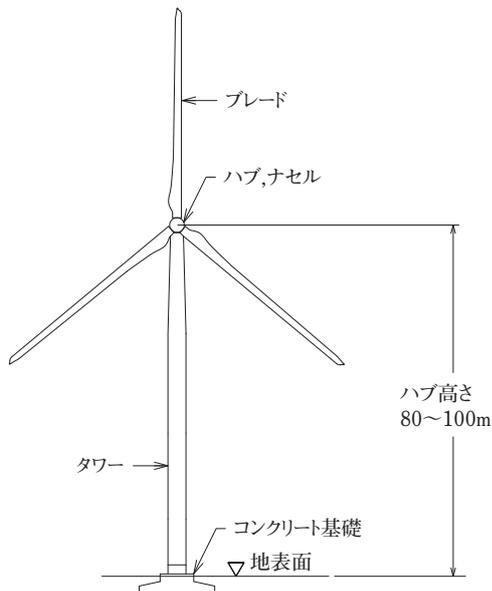


図1 風車外観

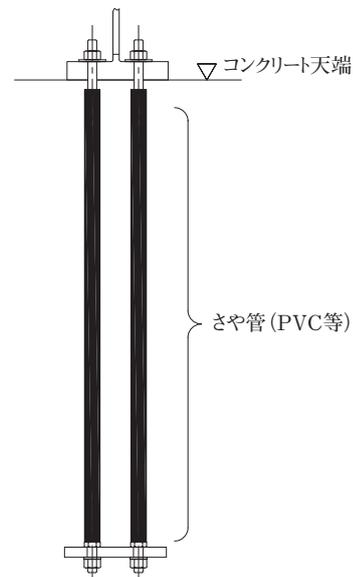


図3 アンボンドアンカーの構造

外力によるタワーの転倒曲げモーメントによる荷重は、圧縮力はタワーのベースプレートから基礎上面へ、一方引張力は埋め込まれたアンカープレートから基礎コンクリートに伝えられる(図4)。さらに、基礎のコンクリート打設・硬化後、アンカーボルトにプレストレス(Pre-stress)を与えてタワーを固定することが風車メーカーの標準仕様となっている。

風車は点検時を除けば常に回転機として振動状態にあり、アンカーボルトを含め疲労荷重を配慮した設計が求められる。アンカーボルトに初期張力を与えるのもボルトの疲労を考慮したもので、その結果、アンボンドアンカーが採用されたと思われる。

風車タワーの直径は道路運送上の制約からタワーの高さに関係なく最大外径が4.5 m程度に抑えられている。このため我が国では、風車自体の大型化・重量増及びタワー高さが高いほどアンカーボルト本数を増加したり、ボルトの径を太くしたりする対応が必要となる。この結果、アンカーボルトの間隔は狭くなり、一般の構造物に比べ密なアンカーボルト配置が特徴となる。このように非常に密なアンカーボルトの配置でプレストレスを与えた場合、アンカーボルト近傍のコンクリートひび割れリスクの増大が懸念される。

3. FEM 解析結果と最適基礎構造

まず、2.で述べた円周状に密に配置したアンボンドアンカーボルトがコンクリート体に埋め込まれている解析モデルを用いて有限要素法(FEM)による構造解析を行った結果を示す。

図5はアンカーボルトにプレストレスを与えたときの計算結果の一例である。図5(a)は基礎コンクリートとアンボンドアンカーボルトの三次元モデルの断面におけるコンクリートの応力状態を示している。アンボンドアンカーボルトの近傍に引張応力が発生しているのが分かる。これらのアンボンドアンカー近傍の応力の圧縮主応力方向及び引張主応力方向を図5(b)と図5(c)にそれぞれ示す。図5(b)ではコンクリートの鉛直方向に圧縮応力が発生していることが示されている。また図5(c)ではアンボルトアンカーに対し直交する水平方向と底部から放射状に引張応力が発生していることが示されている。

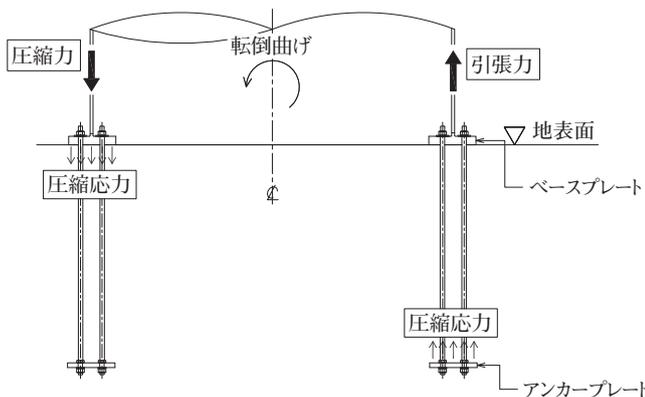
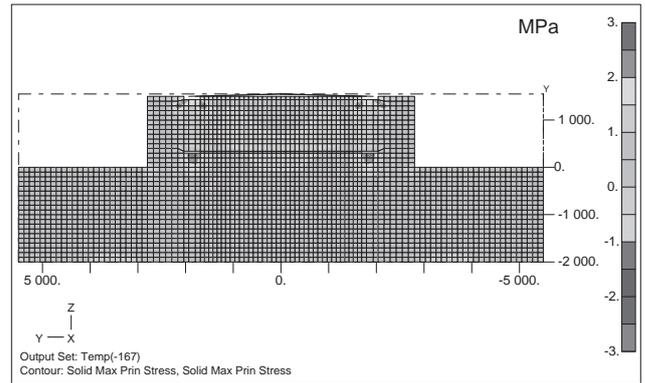
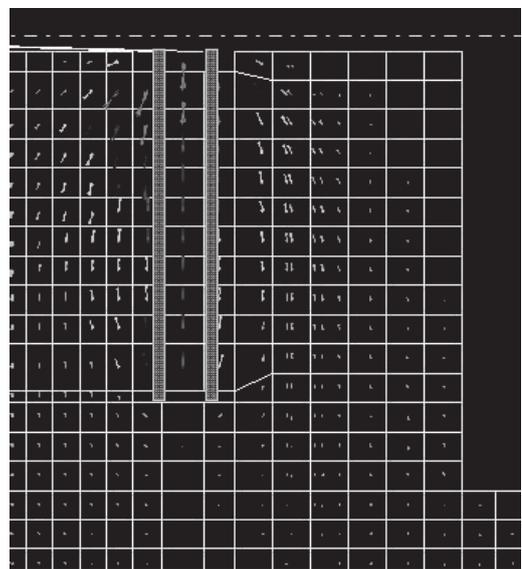


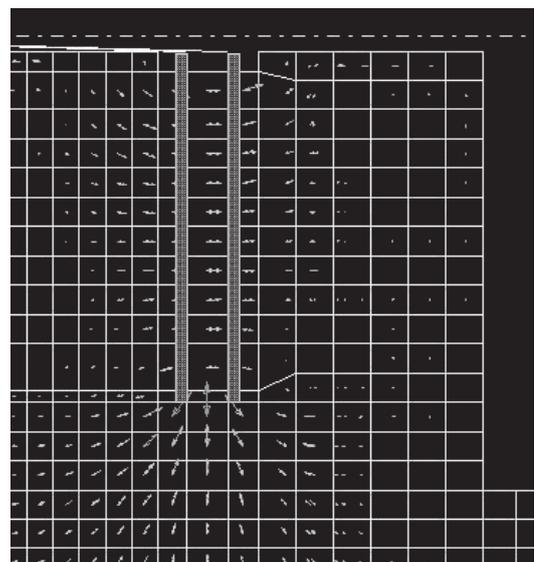
図4 転倒曲げモーメントの伝達



(a) アンボンドアンカーボルト近傍の応力図



(b) 応力主方向図(圧縮)



(c) 応力主方向図(引張)

図5 アンボンドアンカーボルト近傍のFEM解析結果

図5を模式的に表すと図6(a)に示した応力線図となる。引張応力に対抗する鉄筋が不足し、引張応力がコンクリートの許容引張力を超えた場合、ひび割れが発生する。このひび割れのイメージを図6(b)に示す。アンカーボルトに沿って縦方向のひび割れが発生し、更にアンカーボルト下端では水平方向のひび割れが発生すると予測される。鉄筋コンクリート構造の設計では、コンクリート引張力が無いものとなるように引張部位に鉄筋を配し、鉄筋に引張力を負担させるのが一般的な手法である。この場合、引張応力線に沿って鉄筋を配置すると図6(c)のような配筋が必要になり、2本のアンカーボルト軸に沿って、直角(水平方向)に多段の鉄筋が必要となる。

4. 特許の取得(特許 第4242445号)

風車というトップヘビーな構造物では、タワーと基礎の結合部が重要なのは言うまでもない。3.の解析等を経てアンボンドアンカー基礎に放射状の水平鉄筋を多段に配する実用的な基礎配筋方法を考案した。これを風車の基礎構造全体に表したものを図7に示す。

これを特許出願した結果、2009年1月9日、特許 第4242445号として特許を取得した(図8)。

なお、その後、同様の内容で韓国(2009年11月)及び中

国(2012年1月)においても同様の特許を取得した。

5. あとがき

今後は3MW規模の大型風車のみならず、大部分の風車でアンボンドアンカー基礎が埋め込み式基礎に取って替わり、風車基礎形式の主流となることが予想される。本報で示した風車の基礎構造は実用性が高いものと考えており、アンボンドアンカー用の配筋方法として広く利用されることを期待するものである。

参考文献

- 1) 日本建築学会 鉄筋コンクリート構造計算基準 第8版
- 2) 日本建築学会 プレストレスコンクリート設計施工規準・同解説 第4版
- 3) 土木学会 風力発電設備支持構造物構造設計指針・同解説 2010年版

〔問い合わせ先〕

エンジニアリング事業本部 第二設計部
TEL 043 - 351 - 9266 南 陽一

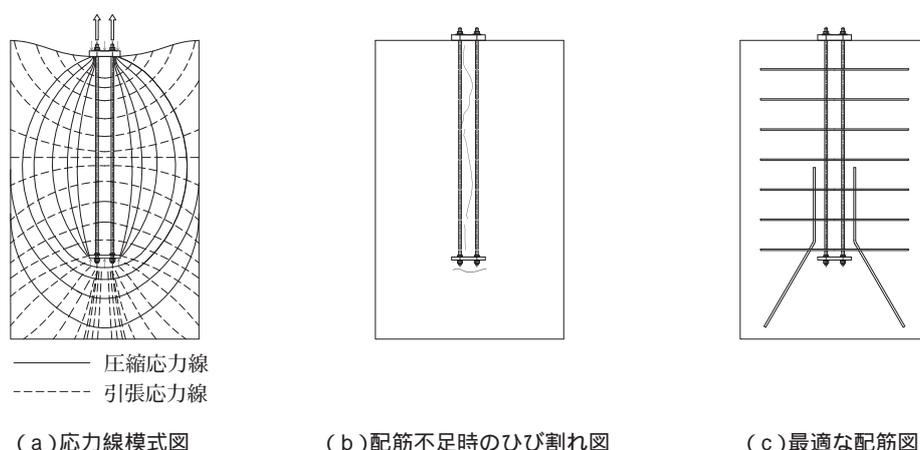


図6 アンカーボルト周辺の発生応力による影響と配筋の最適配置による対策

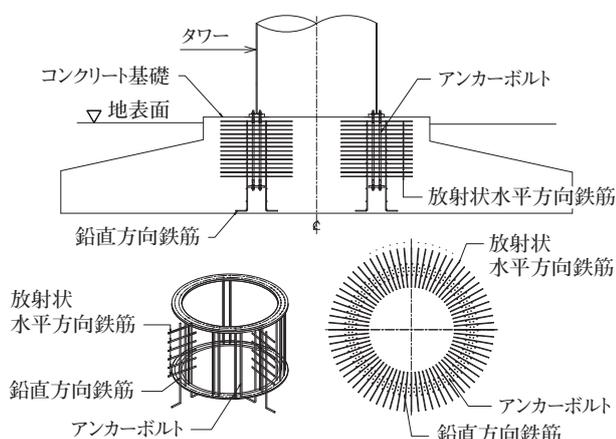


図7 放射状水平鉄筋



図8 取得特許証

メタノール焚き ME-LGI 機関がマリンエンジニアリング・オブ・ザ・イヤー 2015 を受賞

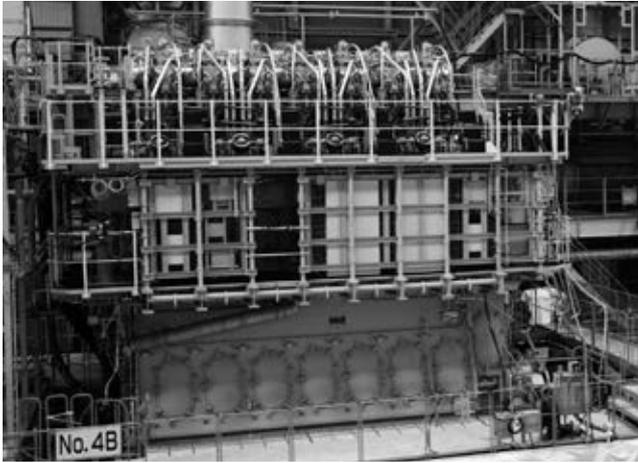


写真1 ME-LGI 機関の外観



写真2 表彰状

三井造船株式会社は、このほど当社が開発した燃料としてメタノール及び重油を利用する二元燃料ディーゼル機関(電子制御式リキッドガスインジェクションディーゼル機関、以下:ME-LGI)において、船舶用・海洋用の機器に関する優れた技術を表彰する公益社団法人日本マリンエンジニアリング学会の「マリンエンジニアリング・オブ・ザ・イヤー2015」を一般財団法人日本海事協会、株式会社商船三井及び南日本造船株式会社と共に受賞した。

ME-LGI 機関は、メタノールや LPG など液体の低引火点燃料をシリンダ内に噴射して燃焼することができる。受賞したメタノール焚き ME-LGI 機関の開発は、MAN Diesel & Turbo 社がコンセプト設計を担当し、当社が機関を開発した。また、本機関及びメタノール供給装置の安全性検討は、国土交通省の「次世代海洋環境関連技術開発支援事業」に採択され、日本海事協会との共同研究の一環としても実施している。

メタノール焚き ME-LGI 機関は、南日本造船株式会社より受注し、株式会社商船三井向けメタノール運搬船に搭載されている。

メタノールは、国際海事機関(IMO)の環境規制を背景に、二酸化炭素(CO₂)排出量の削減が期待できることに加え、硫黄酸化物(SO_x)、粒子状物質(PM)排出の大幅な削減が可能なることから、環境に優しい燃料として注目されている。メタノールを燃料とする主機関を世界に先駆けて実船搭載用に完成させ、海運産業の発展に貢献したことがその受賞理由である。

特長

(1)二元燃料機関

従来の燃料油(=主燃料: Primary Fuel)の噴射系統はそのまま、代替燃料(=2次燃料: Secondary Fuel)

の噴射系を追加した二元燃料機関である。

二元燃料機関については、先行して、天然ガスを二次燃料とする ME-GI 機関の開発が実施されているが、ME-LGI 機関にも ME-GI 機関で開発された技術が踏襲され、活かされている。

(2)ディーゼル燃焼サイクルの採用

主燃料・2次燃料共に、燃費特性に優れたディーゼル燃焼方式を採用している。2次燃料使用時には、主燃料用の噴射装置を利用し、着火用のパイロット燃料を少量噴射している。

(3)主燃料系統によるバックアップ

主燃料系統は、従来機関と同じ冗長性設計がなされていることから、2次燃料噴射系の異常発生時には、主燃料に切り替える安全上の設計思想を採用している。主燃料への切換え後には、機関室内の2次燃料ラインを窒素に置換するパーキングが行われ、2次燃料は全て機関室外に排出する安全設計となっている。

主要目

型式: 7S50ME-B9.3-LGI
シリンダ数: 7
シリンダ径: 500 mm
ストローク: 2 214 mm
定格出力: 8 470 kW
定格回転数: 99 rpm

(機械・システム事業本部)

[問い合わせ先]

ディーゼル営業部
TEL 03 - 3544 - 3475 重村 英明

上空制限条件下における大規模橋梁の架設 - 湾岸道路本牧地区7・8号橋工事 -



写真1 本牧7・8号橋の全景



写真2 多軸式特殊台車による架設状況

東京湾岸道路は、東京湾周辺の横須賀・横浜・川崎・東京・千葉・木更津及び富津等の各都市を結ぶ延長約160kmの幹線道路であり、内陸部の交通混雑の緩和を図るとともに、湾岸に立地する諸都市、諸施設の機能の効率化に資することを目的とした道路で、自動車専用道路と一般道路で構成されている。

本工事は、東京湾岸道路の建設工事の一環であり、横浜ベイブリッジの本牧ふ頭側のアプローチ部に位置する。架設区間は上下2層構造の下層部で、上層部が首都高速湾岸線、下層部が湾岸道路となっている。上層部は既に施工済みで供用されており、限られた桁下空間での施工となった。

特長

本工事(7号橋：鋼3径間連続鋼床版箱桁)の主な特長を以下に示す。

(1)吊上げ架設(第一径間部)

首都高速道路の出入り口であるオン・オフランプ間の狭隘な架設環境であったため、吊上げ架設工法を採用した。センターホールジャッキとPC鋼より線で構成されたジャッキ式吊下げ設備で架設を行った。架設重量は仮設備を含めて495.7tであった。

(2)多軸式特殊台車による架設(第二径間市道交差点部)

ヤード内にて多軸式特殊台車上で地組立てした桁を交差点部交通規制下にて架橋地点まで移動し、台車上に設置したユニットジャッキ設備により所定の位置まで持ち上げ微調整操作により橋桁の架設を行った。

(3)プレキャスト型枠(KKフォーム)を使用した壁高欄

残置式埋設型枠を使用することでコンクリート打設後

の型枠撤去を省略し工期短縮を図った。

主要目

工事名：湾岸道路本牧地区7・8号橋工事
 工事場所：神奈川県横浜市中区本牧ふ頭～錦町
 発注者：国土交通省 関東地方整備局
 請負者：三井造船鉄構エンジニアリング(株)
 工期：自)平成26年6月12日
 至)平成28年3月18日

7号橋

形式：鋼3径間連続鋼床版箱桁
 橋長：286.0m
 支間長：80.2+110.0+94.5m
 幅員：18.8m
 鋼重：2750.0t

8号橋

形式：単径間鋼鈹桁橋
 橋長：20.0m
 支間長：18.8m
 幅員：18.8m
 鋼重：81.0t

(三井造船鉄構エンジニアリング株式会社)

[問い合わせ先]

建設本部 東部工事部
 TEL 0436-43-1853 月岡 義晴

プレキャストスラリートンク - 肥培かんがい施設における配水調整槽への適用 -



写真1 プレキャストスラリートンクの外観

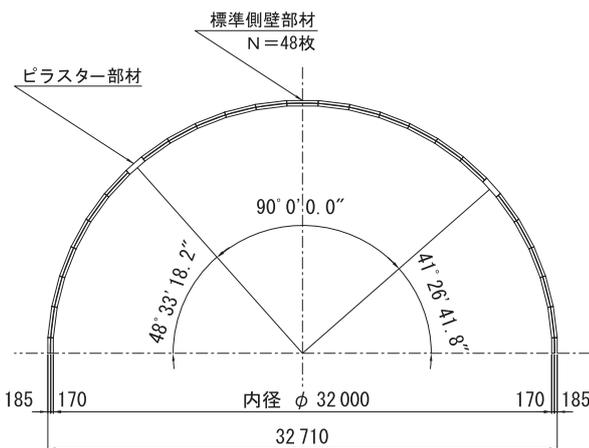


図1 スラリートンク水平配置例

容器構造物には、円筒形タンク・卵形槽・矩形槽があり、上水道・下水道・農業用水・肥培施設などの用途に用いられている。材料では、コンクリート製と鋼製があり、プレキャストPCタンクは側壁や屋根をプレキャスト化することで現場作業の省力化と工期の短縮ができる。ここで紹介するプレキャストスラリートンク(以下、PCaタンク)は、家畜の排せつ物にかんがい用水を加水・希釈して曝気・攪拌したものを、ほ場散布されるまで一時貯留する調整池の役割を担うもので、多年度にわたり同様の構造体を多数構築する計画の事業である。今回の施工地域は、北海道釧路地方であることや、視界の開けた丘陵地帯であるため、頻発する地震の影響や、風雪が厳しい状況での施工を強いられる場合もある。

PCaタンクは、側壁部材をプレキャストとしているため、プレストレスを導入するまで部材が安定せず、側壁部材建て込み時における転倒防止対策が必要である。タンク構造物をプレキャスト工法で製作する技術は従来より用いられてき

たが、適用物件が少ない状況にあった。また、PCaタンクは、今回のスラリートンクのほかにも上下水用タンク、バイオガスプラントなどへの適用も検討されている。側壁部材製作や、施工仕様に関しては「製品製作要領書」・「施工要領書」を作成し、製品の品質管理、施工方法や安全対策から出来形管理まで一貫した品質の高い製品を提供できる体制を構築している。

写真1は、北海道開発局釧路開発建設部に納入した内径29.5mのスラリートンクであり、2015年10月に完成したものである。今回のスラリートンクのような小規模施設の需要もあり、今後様々な用途への適用を模索していく。

特長

(1)スラリートンクの基本構造

標準部材とピラスターを側壁として貯留槽を構成する(図1)。

(2)側壁部材の規格形状化

幅2m×高さ4.9mを標準寸法とすることにより、短時間で多数の側壁部材の製作を可能とした(図2および図3)。側壁部材の下部は0.355mで上部より厚い構造となっている。

(3)ピラスター部材による容易なタンク容量調整

標準側壁部材の割付の調整はピラスター部材で行うため、内径の変化に対しても同一形状の標準部材で対応できる。

(4)耐食性・外傷を考慮したPC鋼材の採用

円周方向のPC鋼材は外巻き方式を採用しており、腐食性物質や農業用機械等による外傷からPC鋼材を保護するため、高密度ポリエチレン系特殊樹脂で被覆したPC鋼材を、更にアンボンド被覆した2重被覆構造の鋼材を使用している。

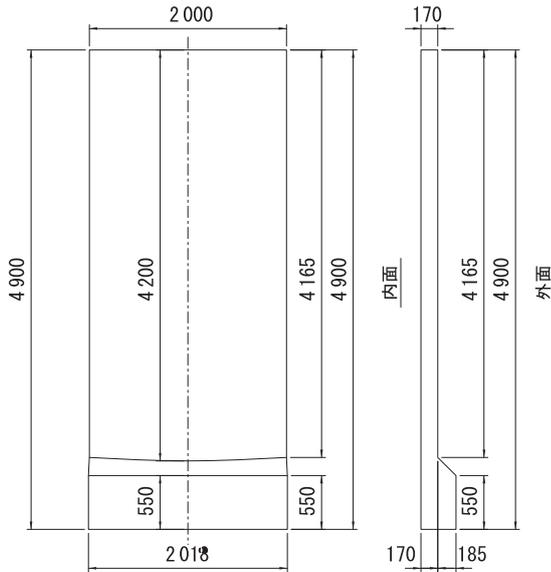


図2 側壁部材の基本寸法

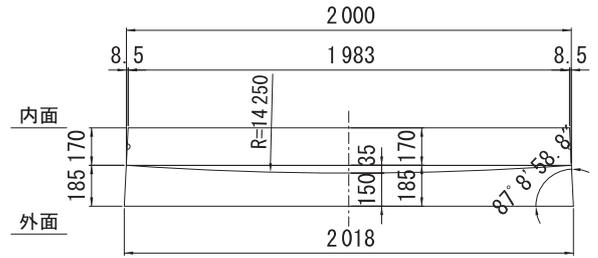


図3 側壁部材の基本断面

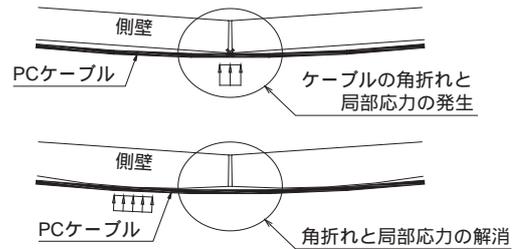


図4 外ケーブル接触イメージ図

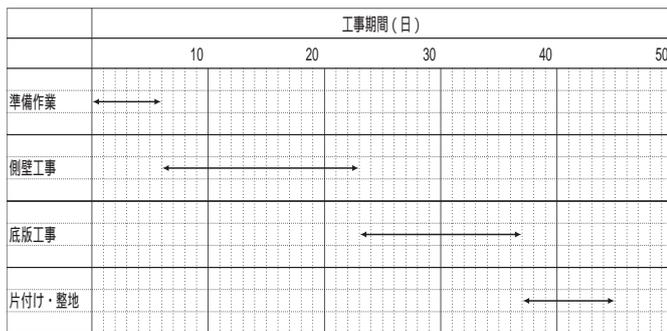


図5 標準的なスラリートンクの工程

(5) 部材間接合部での鋼材折り曲がり防止対策

側壁の外部にはケーブルを配置し、外部より締め付けることにより円周状の貯槽を構成する。また、側壁部材の外縁に膨らみを持たせ部材間の接合部に外ケーブルを接触させない構造とすることで、接合部での外ケーブル折れ曲がりや局部応力の発生を回避している。(図4)

(6) 三次元地震応答解析の実施

PCa タンクの目地は鉄筋の連続性がない。円周 PC 鋼材も外巻き構造のため補強材として期待できない。また、施工地域が北海道釧路地方であるため大規模地震が想定される。そこで、目地部の地震時挙動と耐震性を確認する目的で釧路沖地震の地震波を用いた解析を行い、面外

方向に対する目地ズレや、目地開きに対する止水性を検証している。

(7) 短期間の現場施工

整地終了後の標準的なスラリートンクの工程を図5に示す。ここに示したとおり PCa タンクは、プレキャスト工法を採用することにより、40 日余りの現地工事で建設可能である。

主要目

- 形式 : 円筒形プレキャスト PC タンク
- 構造 : 円周方向 PC 構造, 鉛直方向 RC
- 容量 : 2 400 m³ ~ 5 000 m³ 程度
(上部余裕高 500 mm 確保)
- 内径 : 28.0 m ~ 40.0 m
- 壁高 : 4.500 m
- 壁厚 : 0.170 ~ 0.205 m (構造解析時 0.170 m)
- 標準側壁部材重量 : 5.7 t/ 枚
- 側壁部材配置構成枚数 : 標準部材 48 枚
(内径 32 m での例) プラスター部材 4 枚

(ドービー建設工業株式会社)

[問い合わせ先]

技術部 北海道グループ
TEL 011 - 221 - 1571 伊藤 拓

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	〒450-0003	名古屋市中村区名駅南1丁目24番30号(名古屋三井ビルディング)	TEL 052-582-0145
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	北京, ジャカルタ, ハノイ
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(上海)商貿有限公司 MES タイ(バンコク) 三井造船アジア株式会社(シンガポール)

三井造船技報編集委員会

委員長	木戸口 晃
委員	木澤 厚夫 神 永 肇 難 波 浩一 速 水 礼 佐 野 健一 村 田 和俊 兼 本 浩

三井造船技報

第217号

2016年(平成28年)9月15日発行

発行人	鳥井 幸典
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 まで。

万一、落丁・乱丁がありました節は、お取り替えます。

(非売品、無断転載を禁ず)

三井造船技報 第 217 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 217 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，鉱石運搬船，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（シーバース，ケーソン，沈埋函，ジャケツト），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，石炭化学，発酵関連，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，分解ガスケンチャー，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，太陽熱発電設備，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，バイオエタノール設備

三井リサイクリング 21（キルン式ガス化溶融システム），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）

