

三井 造船 技報

平成 24 年 7 月 第 206 号

MITSUI ZOSEN TECHNICAL REVIEW No. 206 2012



再生可能エネルギー小特集号



表紙説明

再生可能エネルギー小特集号

本報は、三井造船が新たな取り組みとして研究開発を進めている4編を紹介した再生可能エネルギー小特集号として発行する。

CO₂削減を目的とした新型帆装船舶の性能評価技術の開発
将来、更にCO₂の削減要求が求められた場合の一つの手段として、風力エネルギーを補助推進力として利用することを旨とした要素試験結果とプログラム開発を紹介する。

太陽熱発電システム（第1報）

太陽熱発電システムで最も重要な要素機器である集熱レシーバの性能実証試験結果を示している。

流力振動を利用した水流発電技術の有効性検証

従来の発電方式とは全く異なる新たな発電方式の概念を提案し、水槽試験により得られた力学特性を紹介する。

素反応解析技術を用いたバイオマス由来ガス組成推算技術の開発
化石燃料の代替えとして期待される種々のバイオマスからの分解ガスに対して適用可能なガス組成推算技術を紹介する。

Cover

Special Issue on New Technologies of Renewable Energy

This special issue contains following 4 papers concerning new efforts by Mitsui Engineering & Shipbuilding Co., Ltd. on renewable energy technology.

Development of Evaluation Technology of the Sail-Equipped Vessel to Reduce CO₂ Emission

To cope with further regulations for reduction of CO₂ emission in the near future, MES performs some basic tests for sail equipped vessel which is one of effective methods to reduce CO₂ gas and develops a program to estimate its effect during voyage.

Concentrated Solar Power (CSP) System (Report #1)

In a concentrated solar power plant, the solar receiver is the most important element. Performance demonstration test of the solar receiver is shown in the paper.

Investigating Possibility of Hydroelectric Power Generation based on Flow Induced Vibration

A new hydroelectric power generation system based on the flow induced vibration is being developed. Hydraulic test proves its availability.

Estimation Method of Gas Composition from Biomass by Detailed Chemical Kinetic Modeling

MES has succeeded in estimating the tar components in the pyrolysis volatiles from some kinds of biomass which is expected to replace fossil fuel.

三井造船技報

2012年(平成24年)7月・第206号

目次

再生可能エネルギー小特集

| | |
|--|----|
| CO ₂ 削減を目的とした新型帆装船舶の性能評価技術の開発 | 1 |
| 松田 識史 喜多代 顕彦 平山 明仁 | |
| 太陽熱発電システム(第1報) - 集熱レシーバの性能実証試験 - | 7 |
| 安藤 善一 友保 純直 筒井 伸幸 江澤 一明 | |
| 酒井 章次 楠田 雅之 佐々木 庸 角田 大作 | |
| 流力振動を利用した水流発電技術の有効性検証 | 14 |
| 林 健一 比江島 慎二 岡 圭人 井上 浩男 | |
| 素反応解析技術を用いたバイオマス由来ガス組成推算技術の開発 | 19 |
| 宮地 健 片桐 学 藤田 理人 | |
| 神田 伸靖 則永 行庸 | |

技術論文・報告

| | |
|-----------------------------|----|
| 犠牲陽極を使用した鋼材の大気防食技術の開発 | 25 |
| 石原 修二 内田 大介 浅野 浩一 | |
| 西山 研一 高川 真仁 | |

製品・技術ニュース

| | |
|--|----|
| 森永橋歩道橋(鋼上部工)工事 - ニールセンローゼ橋の製作・架設 - | 31 |
| 加古川中央 JCT 本線橋他鋼上部工工事 - 国道2号加古川バイパスを跨ぐ橋梁の製作・架設 - | 32 |
| 海上架構製作工事 - 直江津 LNG 受入基地向け鋼管トラス形式海上架構の製作 - | 34 |
| タンジュン・ジャティ B 石炭火力発電所 3&4 号機 - インドネシアにおける大型土木建築工事の遂行 - | 36 |

Home Page News

| | |
|--|----|
| 船舶用ディーゼルエンジン NOx 三次規制対応 世界初のビルトイン(エンジン一体)型 EGR で規制値クリアを確認 | 38 |
|--|----|

MITSUI ZOSEN TECHNICAL REVIEW

No. 206 JULY 2012

CONTENTS

Special Issue on New Technologies of Renewable Energy

| | |
|---|----|
| Development of Evaluation Technology of the Sail-Equipped Vessel to Reduce CO ₂ Emission | 1 |
| <i>Satoshi MATSUDA, Akihiko KITADAI, Akihito HIRAYAMA</i> | |
| Concentrated Solar Power (CSP)System(Report #1) Performance Test of Solar Receiver | 7 |
| <i>Yoshikazu ANDO, Yoshitada TOMOYASU, Nobuyuki TSUTSUI, Kazuaki EZAWA Shoji SAKAI, Masayuki KUSUDA, Yoh SASAKI, Daisaku SUMIDA</i> | |
| Investigating Possibility of Hydroelectric Power Generation based on Flow Induced Vibration | 14 |
| <i>Ken-ichi HAYASHI, Shinji HEIJIMA, Keito OKA, Hiroo INOUE</i> | |
| Estimation Method of Gas Composition from Biomass by Detailed Chemical Kinetic Modeling | 19 |
| <i>Ken MIYACHI, Manabu KATAGIRI, Masato FUJITA, Nobuyasu KANDA, Koyo NORINAGA</i> | |

Technical Paper and Report

| | |
|--|----|
| Development of Anticorrosion Engineering of Steel Products using a Sacrificial Anode under the Atmosphere | 25 |
| <i>Shuji ISHIHARA, Daisuke UCHIDA, Koichi ASANO, Ken-ichi NISHIYAMA, Shinji TAKAGAWA</i> | |

Products and Technology News 31, 32, 34, 36

Home Page News 38

Published by

MITSUI ENGINEERING & SHIPBUILDING CO., LTD.
6-4, Tsukiji 5-chome, Chuo-ku, Tokyo 104-8439, JAPAN

CO₂ 削減を目的とした新型帆装船舶の性能評価技術の開発

松田 識史* 喜多代 顕彦* 平山 明仁**

Development of Evaluation Technology of the Sail-Equipped Vessel to Reduce CO₂ Emission

Satoshi MATSUDA, Akihiko KITADAI, Akihito HIRAYAMA

Mitsui Engineering & Shipbuilding Co., Ltd. (MES) group has been developing technologies to reduce CO₂ emission from ocean going vessel. Above all, MES started the project to develop vessel with significant reduction of CO₂ emission in 2008, and CO₂ 30% reduction of several vessels including VLCC was achieved under the project. This successful result was attributable to the improvements in various element technology related to vessel's operation, hull and main engine. In addition to such response to the immediate demand to reduce CO₂ emission, we are promoting further research and development (R&D) as one of technology to respond to a possible demand for greater reductions of CO₂ emission in the future.

In this paper, we introduce three results in the R&D, wind tunnel test, development of method to estimate CO₂ emission reduction, and development of free running model-test, whereby, we established an efficient evaluating system for maneuverability and CO₂ reduction of the sail-equipped vessel.

三井造船は、自然エネルギーである風力を利用する帆に注目した新型帆装船舶の開発を進めている。当社は、2008年にCO₂大幅削減船開発プロジェクトを発足させ、これまでに大型原油タンカー（VLCC）をはじめとした複数の船型においてCO₂排出量の約30%削減を実現している。CO₂排出量の削減は、造船及び主機のトップメーカーの強みを生かし、船体、主機そして運航までをも含む様々な要素技術を改善したものである。これらの技術開発により、当面のCO₂削減要求に対応可能となったが、当社では更に将来のより大幅なCO₂削減要求にも応えられる技術の一つとして、本研究開発に取り組んでいる。

本報では、その研究開発の中で行われた「風洞試験」、「CO₂削減効果推定プログラムの開発」、「帆装船の自走模型試験技術の確立」について報告する。風洞試験によって、実船への適用が想定される複数の帆形状の空力特性を明らかにするとともに、CO₂削減効果推定プログラムと自走模型試験技術の開発により、帆装船舶のCO₂削減効果や挙動等を効率的に把握することが可能になった。



a) 帆形状 A1 ~ A3

b) 帆形状 A2-1

c) 帆形状 B

写真1 供試模型形状
Shape of Tested Models



写真2 帆装自走模型船試験
Free Running Test of Ship Model

* 株式会社三井造船船島研究所

** 技術開発本部 技術総括部

1. 緒言

世界的規模で地球温暖化防止の努力が続けられる中、三井造船グループは、船舶から排出されるCO₂削減に積極的かつ継続的に取り組んでいる^{1),2)}。特に、2008年にCO₂大幅削減船開発プロジェクトを発足させ、これまでに大型原油タンカー（Very Large Crude oil Carrier: VLCC）、バルクキャリアなどの複数の船型においてCO₂排出量の約30%削減を実現している³⁾⁻⁵⁾。これらのCO₂排出量削減は、造船及び主機のトップメーカーの強みを生かし、船体、主機そして運航までも含む様々な要素技術を改善したものである。これらの技術開発により、当面のCO₂削減要求に対応可能となったが、当社では更に将来のより大幅なCO₂削減要求にも応えられるよう研究開発を進めている。

大幅なCO₂削減要求に応える有効な手段として、CO₂を排出しない装置を船舶の推進補助に用いることが考えられる。その一つとして、当社では、自然エネルギーである風を利用する帆に着目している。帆を装備した貨物船は、1980年代に、内航タンカー「新愛徳丸」⁶⁾や外航ばら積み船「ウスキパイオニア」⁷⁾など十数隻が建造されており、CO₂削減効果が大きいことが確認されている。帆はCO₂削減装置として非常に有望で、当社では、その実用化に向けた研究開発を進めている。

本報では、その研究開発の中で行った「風洞試験」、「CO₂削減効果推定プログラムの開発」、「帆装船の自走模型試験技術の確立」について、その概要を述べる。

2. 風洞試験

当社は、これまで様々な帆形状について風洞試験⁸⁾を実施してきた。今回は、実船への適用が想定される帆形状について、空力特性を把握するため、風洞試験を実施した。

2.1 試験方法

風洞試験は、三井造船昭島研究所の風洞を使用した。風洞の測定部寸法及び送風装置仕様を表1に示す。

風洞試験では、図1に揚力と抗力の定義を示すように一様流中に帆模型を設置し、迎角を変化させた時の揚力L及び抗力Dを計測する。計測した結果は式(1)に示す無次元化を行った。

$$C_L = L / (1/2 \rho U^2 \cdot S)$$

$$C_D = D / (1/2 \rho U^2 \cdot S) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、C_L:揚力係数、C_D:抗力係数、ρ:空気密度、U:

表1 三井造船風洞の主要目
Major Characteristics of MES Wind Tunnel

| | |
|--------|--------------------------|
| 測定部寸法 | 長さ 20 m × 幅 2 m × 高さ 3 m |
| 送風装置仕様 | 直流電動機駆動, 最大出力 125 kW |
| 最高風速 | 20 m/s (閉鎖型風路) |
| | 30 m/s (開放型風路) |

流入風速度、S:帆の投影面積、L:揚力、D:抗力である。

この計測結果から、空力特性を把握する上で重要な揚力係数C_L及び抗力係数C_Dを得ることができるとともに、流れの剥離により揚力Lが急激に減少する失速現象が発生する迎角を把握することができる。

2.2 供試模型

左右対称型硬帆4種と多段翼型硬帆1種の計5種を対象とした。硬帆とは、風圧下においても、無風下と同じ形状を保つ構造の帆である。供試模型の帆投影面積は、高さ(スパン)1000 mm×幅(翼弦長C)600 mmで同じであるが、キャンバーの形状等は以下に示すとおり異なっている。主要な供試模型を写真1に示す。

左右対称型硬帆は、写真1a)に示す形状で、キャンバーの異なる3種の形状の模型とした。キャンバーは、1980年代に建造された帆装船などの値を参考にして決定した。なお、写真1b)に示すように、中間のキャンバーを持つ帆にスラットを取り付けた供試模型も考慮した。

左右対称型硬帆は、1980年代の帆装内航タンカーに採用されていた矩形薄型の硬帆に類似する形状であり、単純な構造で製作しやすく、迎角制御以外の可動部が不要なため、制御が単純でかつ、故障が少なくなる利点がある。ここでは、キャンバーの小さいものから順に帆形状A1、A2、A3と呼び、帆形状A2に、スラットを取り付けたものを帆形状A2-1と呼ぶこととする。

多段翼型硬帆は、写真1c)に示すように、三つの対称翼からなる構造であり、航空機の翼に用いられる高揚力装置であるスリットとスロテッドフラップの効果を狙った形状を持つものである。多段翼は、航空機の実績も多く、揚力係数が高いことが知られている。このため、左右対称型硬帆に比べ複雑になる欠点はあるが、試験対象として採用した。供試模型とした多段翼型硬帆には、翼端板も装備している。ここでは、多段翼型硬帆を帆形状Bと呼ぶこととする。

2.3 計測項目及び条件

風速7.0 m/sにおいて、揚力Lと抗力Dを計測した。迎角は、帆形状A1～A3については0～90°、帆形状Bについては-45°～180°とした。

2.4 計測結果

図2に、計測した帆形状A1～A3、帆形状A2-1、帆形状

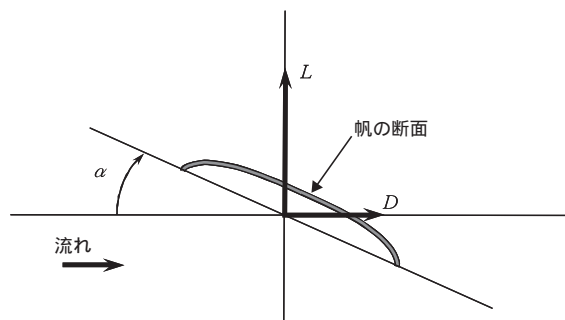


図1 揚力及び抗力の定義
Definition of Lift and Drag

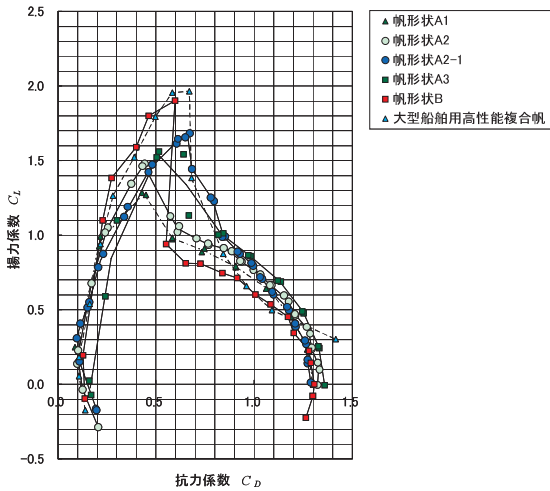


図2 帆形状空力特性
Aerodynamic Characteristics of Sails

Bの揚力係数 C_L 及び抗力係数 C_D を示す。なお、図2には、1980年代に当社が開発した大型船舶用高性能複合帆の試験結果⁸⁾を合わせて示している。この複合帆は、マストを兼ねる翼断面形状の硬帆、三角形側面形状を持つ軟帆、そしてスラット状の硬帆を組み合わせたもので、当時検討した中で最も性能が優れていたものである。

なお、帆形状 A1 ~ A3 の帆の投影面積は、帆の部分の側投影面積を用いたが、高揚力装置が取り付けられている帆形状 A2-1 については、取り付けられた状態での側投影面積を用いた。また、帆形状 B では、各翼の取付角 0.0° の場合の側投影面積を用いた。

図2より、左右対称型硬帆は、可動部の無い単純な帆であるが、最大揚力係数が1.5以上の性能を有していることが確認された。また、スラットを取り付けた帆形状 A2-1 は、簡便な高揚力装置を取り付けた帆であるが、帆形状 A2 に比べて0.2程度高い最大揚力係数を示し、可動部の無い帆としては高い性能を示している。多段翼を持つ帆形状 B は、帆形状 A2-1 よりも更に高い揚力係数を示し、大型船舶用高性能複合帆に近い性能を有している。

風向が大きく変動する状況下での帆装置の運用を考えると、帆の推力を維持するために、失速が緩やかであることが有利となる。帆形状 A2 や帆形状 A2-1 は、帆形状 B、大型船舶用高性能複合帆に比べ、失速による空力特性の変化が緩やかであり、このような状況下での運用に適した特長を有していることが確認された。

3. CO₂削減効果推定プログラムの開発

帆装船舶の実海域でのCO₂削減効果を効率的に評価するため、CO₂削減効果推定プログラムを開発した。

3.1 プログラムの概要

開発したCO₂削減効果推定プログラムは、操縦運動シミュレーションで用いられる数学モデルをベースとしたもの⁹⁾であり、航路上の各点において、船に作用する力とその釣り

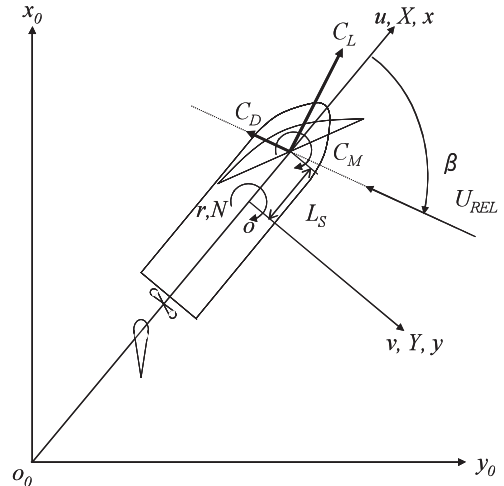


図3 CO₂削減効果推定プログラム座標系
Coordinate System of Estimating Program for CO₂ Emission Reduction

合い状況を計算し、各点での主機回転数や必要馬力等を計算してCO₂削減効果を求める機能を有する。入力する情報は、帆を搭載する船舶の情報(船体・舵・主機・プロペラ)、帆の空力特性と面積、航路、航路上各点での目標船速及び気象情報である。

船体の操縦運動の座標系は図3に示すような船体固定座標系 $o-xy$ を用いた。

操縦運動方程式は、各速度成分を u, v, r とすると、式(2)のように表せる。

$$\left. \begin{aligned} m(\dot{u} - vr) &= X_H + X_P + X_R + X_W + X_S \\ m(\dot{v} + ur) &= Y_H + Y_R + Y_W + Y_S \\ I_{ZZ}\dot{r} &= N_H + N_R + N_W + N_S \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 m : 船の質量、 I_{ZZ} : 船のZ軸回り慣性モーメントである。 X, Y は力を、 N はモーメントを示しており、添え字 H, P, R, W, S は、船体、プロペラ、舵、上部構造物の風圧力、帆の風圧力を表す。

帆が発生する流体力は式(3)で表される。

$$\left. \begin{aligned} X_S &= (C_L \sin \beta - C_D \cos \beta) A_S \cdot 1/2 \cdot \rho \cdot U_{REL}^2 \\ Y_S &= (C_L \cos \beta + C_D \sin \beta) A_S \cdot 1/2 \cdot \rho \cdot U_{REL}^2 \\ N_S &= Y_S \cdot L_S + C_M \cdot A_S \cdot c \cdot 1/2 \cdot \rho \cdot U_{REL}^2 \end{aligned} \right\} \dots\dots(3)$$

ここで、 C_M : ヨーモーメント係数、 β : 相対風向、 A_S : 帆面積、 U_{REL} : 相対風速、 L_S : 船体中央からの帆取り付け位置、 c : 翼弦長である。

帆の迎角は、船首方向の帆全体の推進力 X_S が最大となる角度が常に維持されるものとして計算している。

主機回転数については、目標船速を保つように回転数を増減させている。この時、回転数が変化することにより、プロペ

ラ作動点が変わり、プロペラ効率も変化する。そこで、航路上各点での制動馬力は、回転数の変動による主機馬力の変化だけでなく、プロペラ効率の変化も加味して算出している。

舵角は、水平面内の移動方向を目標の針路と一致させるように当て舵を計算しており、当て舵による抵抗増加も考慮している。

3.2 計算例

実海域でのCO₂削減効果を予測するために、帆装置を搭載したVLCCが、ペルシャ湾から日本近海までを通常航海速力で航海した場合の計算を行った。

計算対象とした航路は、当社開発のウェザールーティングシステム¹⁰⁾を用いて、帆装置を装備していないVLCCが、最小燃料消費を狙って航海した時の最適航路計算結果であり、それぞれの月で最適航路を計算した結果を用いている。この最適航路上の点ごとに、公表されている気象情報から風向と風速の出現頻度を求めている。

帆の空力特性は、揚抗比の大きい帆形状B(多段翼型硬帆)のものを用い、帆面積は、搭載可能な最大のものを用いた。

月間の平均必要馬力は、航路上の各点ごとに複数の風向風速に対する必要馬力を計算し、風向・風速の頻度を加味して、期待値である必要馬力を求め、これらを航路上全点で平均して求めた。

図4に、各月の平均必要馬力から求めた馬力利得の計算

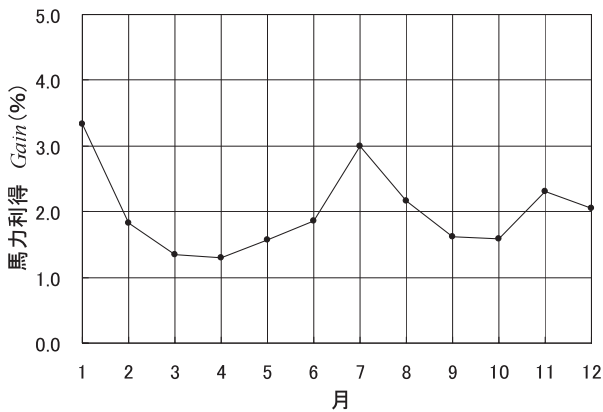


図4 ペルシャ湾～日本近海を航行した場合の月別のCO₂削減効果(VLCC) Result of CO₂ Emission Reduction of VLCC from Persian Gulf to JAPAN

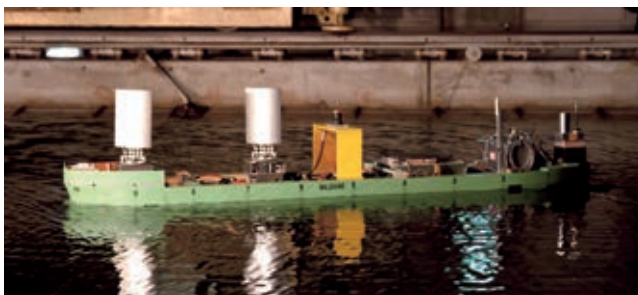


写真3 帆装自走模型船 Ship Model with Sails for Free Running Test

結果を示す。横軸は月を示し、縦軸は馬力利得を表す Gain を示している。馬力利得は式(4)により求めている。

$$Gain = (BHP_{W/O} - BHP_{with}) / BHP_{W/O} \dots\dots\dots(4)$$

ここで、Gain: 馬力利得、BHP_{W/O}: 帆を装備しない状態での必要馬力、BHP_{with}: 帆を装備した状態での必要馬力である。

CO₂排出量は燃料消費量に比例するため、CO₂排出量の推定には、主機の燃料消費率も考慮する必要がある。ただし、主機の作動点が大きく変わらない場合、燃料消費量はほぼ馬力に比例していることから、馬力利得からおよそのCO₂削減効果が評価できる。

図4に示すように、ペルシャ湾から日本近海までを航海した場合、夏季及び冬季のCO₂削減効果が大きいことが分かる。最もCO₂削減効果が期待できるのは1月であり、一航海平均で3%以上のCO₂削減効果となる。また、年間平均CO₂削減効果は約2%であり、有意なCO₂削減効果が期待できる。

4. 帆装船の自走模型試験技術の確立

帆装船舶のCO₂削減効果と操縦特性の推定を行うプログラムをそれぞれ開発した。これらのプログラムの検証のため、水槽試験等によって検証データを収集することが考えられるが、帆装船舶の水槽試験例は無い。そこで、これまでに培った水槽試験技術の知見を生かして、帆装船の自走模型試験法の技術確立を目指した。

4.1 供試模型及び自走システム

帆模型を装備した自走模型船を写真3に示し、使用した供試模型船の主要目を表2に示す。

本自走模型船には、帆模型のみならず、実船と同様にプロペラと舵が装備されている。そのため、帆を装備する船舶で想定されている主機とプロペラによる推力と帆推力を利用した航行を模擬することができる。

使用した帆模型の帆形状高さは300mm、翼弦長Cは

| 項目 | 寸法 |
|------------|---------|
| 垂線間長 (Lpp) | 2.95 m |
| 全幅 (B) | 0.546 m |
| 型深さ (D) | 0.262 m |

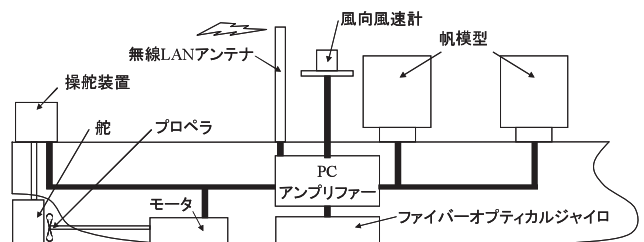


図5 自走模型システム System of Free Running Model

200 mm であり、迎角及び格納・展帆の制御と、帆に作用する揚力、抗力の計測が可能となっている。

図5に帆装自走システムの概要を示す。超音波式風向風速計を船体中央部に設置し、計測された風向データを用いて、目標針路の方向の推力が最大となるように帆の制御を行っている。ファイバーオプティカルジャイロにより、方位、回頭角速度を計測する。陸上のPCから無線LANを通じて、船上のPCへ指令を送ることで、舵角及びプロペラ回転数を制御している。計測された各種データ及び制御結果は、船上のPCに記録される。

4.2 試験方法

試験は、三井造船昭島研究所の大水槽(長さ220m、幅14m、深さ6.5m、水深6.0m)を用いて行った。

実際の海上での風を模擬するため、図6に示すように、曳航台車に送風機を設置し、台車で自走模型船を追尾させながら送風機を動作させ、風圧下の状況を再現した。

模型船速は、実船とフルード数を合わせ、実船と模型船での船速と風速の比を同一とした。試験風速は、実船で絶対風速30m/s相当(2.8m/s)とし、模型試験での帆装船の挙動を確認しやすくするために大きな風速とした。また、絶対風向で針路に対して真横からの風を模擬した。

4.3 試験結果

開発した帆装自走システムを用いて、風圧下直進試験と風圧下変形Z(ジグザグ)試験を実施した。その結果、本自走システムにより帆装自走模型船を所期の予想どおりに航走さ

せることができ、各種データを取得するとともに、帆装船舶の挙動把握が可能となった。

4.3.1 風圧下直進試験

図7に帆制御下における風圧下直進試験の相対風向、相対風速、帆角から計算した迎角、目標迎角の時系列結果を示し、図8に図7と同時刻における船首方位、舵角、回頭角速度の時系列結果を示す。

図7に示すように、風向は、平均相対風向73.5°に対して±17.5°で変動しているが、試験航走全体を通して目標迎角を保つように制御した。また、図8に示すように、舵角の制御は、船首方位が一定となるように滑らかに行っているため、回頭角速度はほとんど変化していない。

4.3.2 風圧下変形Z試験

風圧下での変形Z試験は、船首方位が3°になった時点で、反対舷に30°舵角を切るように自動操舵した。

図9に、帆制御下における風圧下変形Z試験の相対風向、相対風速、帆角から計算した迎角、目標迎角の時系列結果を示す。また、船首方位、舵角、回頭角速度の時系列結果を図10に示す。回頭角速度は最大で約8/sと大きいですが、相対風向が変化しても目標迎角を保つように制御されていることが分かる。

5. 結言

当社にて、帆装船舶や帆装置の実用化を目指し進めている研究開発において、「風洞試験」、「CO₂削減効果推定プログ

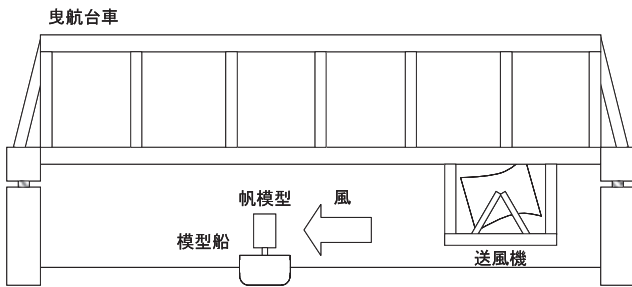


図6 帆装自走模型船試験方法
Experimental Set-Up of Free Running Test

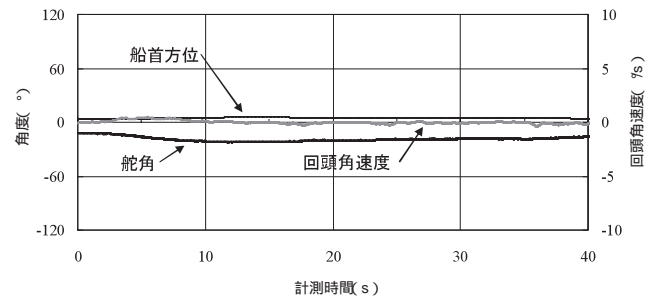


図8 風圧下直進試験での船体情報時系列計測結果
Time Series Data of Ship Model in Course Keeping Test

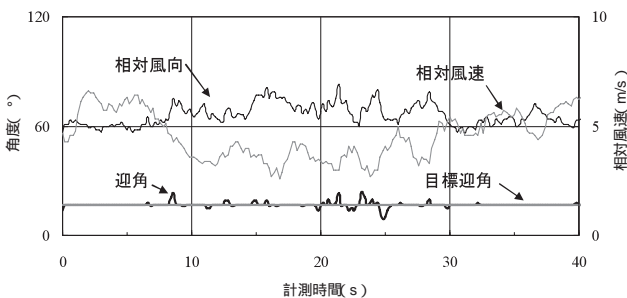


図7 風圧下直進試験での風情報時系列計測結果
Time Series of Wind in Course Keeping Test

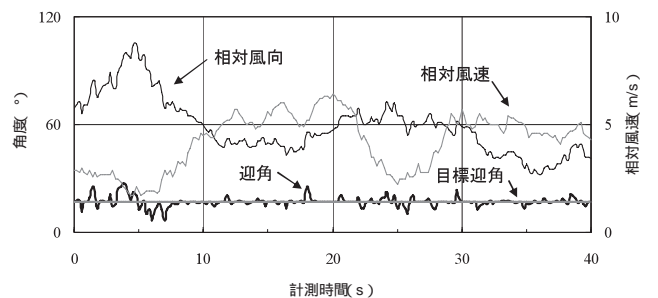


図9 風圧下変形Z試験での風情報時系列計測結果
Time Series of Wind in Modified Zigzag Maneuver Test

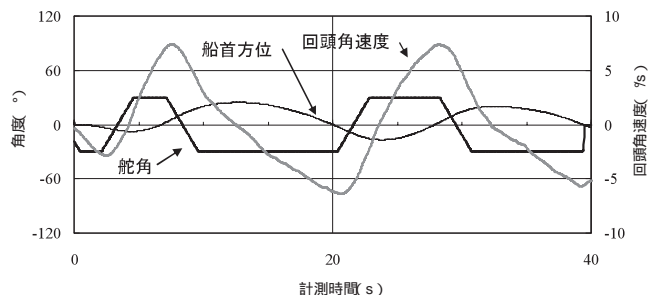


図 10 風圧下変形Z試験での船体情報時系列計測結果
Time Series Data of Ship Model in Modified Zigzag Maneuver Test

ラムの開発」及び「帆装船の自走模型試験技術の確立」を行った。これらにより、実船への適用が想定される帆形状の空力特性を把握でき、帆装船舶のCO₂削減効果や操縦特性の評価が可能となった。さらに、帆装船舶の自走試験により、検証データの取得や直接的な帆装船舶の挙動の把握も可能になった。

帆装船舶の実用化に向けては、まだ解決すべき課題が存在する。1980年代に多数建造された帆装船舶は有意な省エネルギー性能を持っていたにもかかわらず、現存するものは無い。これらの帆装船舶は、停船中及び輻輳海域での安全性や、メンテナンス等に問題があったと言われている。

当社では、これらの過去の帆装船舶が持つ問題点を含む様々な技術課題を抽出している。今後、これらの技術課題を一つ一つ解決し、より進歩した帆装船舶と帆装置の実現化を目指して、さらなる研究開発を進めていく所存である。

参 考 文 献

- 1) 藤井．外：CFDを用いた船型開発システム，三井造船技報，177(2002-10)，p. 1
- 2) 藤井．外：CFDを用いた船型開発システム(第2報)，三井造船技報，190(2007-3)，p. 8

- 3) 藤井．外：CO₂排出量大幅削減船の開発，三井造船技報，203(2011-7)，p. 37
- 4) 松村．外：近年の船型開発における最新省エネ技術 - CO₂排出量30%削減を目指して - ，三井造船技報，201(2010-10)，p. 1
- 5) 田中．外：CO₂削減を目指した船舶ディーゼルエンジン主機の新制御システムの開発，三井造船技報，203(2011-7)，p. 44
- 6) "Sailing Tanker 'Shin Aitoku Maru'", Japan Marine Machinery Development Association, 1983
- 7) "D/W26,000M.T. 型近代帆装貨物船ウスキパイオニア"，(財)日本船舶振興会，(財)日本舶用機器開発協会，田中産業(株)，中村汽船(株)
- 8) 野尻．外：最大揚力係数2.42の大型船舶用高性能複合帆を開発 - 燃料消費量及び炭酸ガス排出量の削減に期待 - ，三井造船技報，178(2003-2)，p. 132
- 9) 平野．外：船舶の操縦運動計算システムの開発，三井造船技報，122(1984-6)，p. 1
- 10) 村上．外：船体性能解析サービスの開発，三井造船技報，195(2008-10)，p. 28

〔問い合わせ先〕

技術開発本部 技術総括部
TEL 03 - 3544 - 3245 平山 明仁



松田 識史



喜多代 顕彦



平山 明仁

太陽熱発電システム(第1報)

- 集熱レシーバの性能実証試験 -

安藤 善一* 友保 純直** 筒井 伸幸** 江澤 一明***
 酒井 章次*** 楠田 雅之* 佐々木 庸**** 角田 大作*****

Concentrated Solar Power (CSP) System (Report #1) Performance Test of Solar Receiver

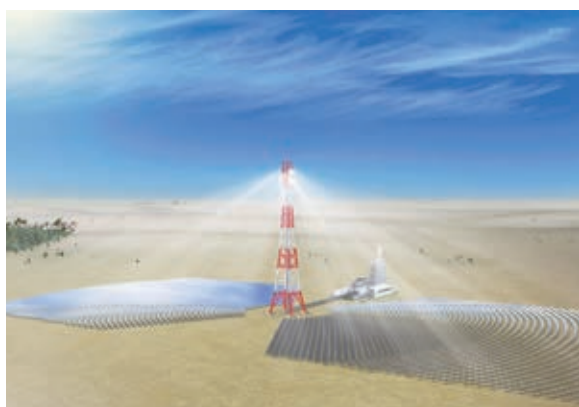
*Yoshikazu ANDO, Yoshitada TOMOYASU, Nobuyuki TSUTSUI, Kazuaki EZAWA
 Shoji SAKAI, Masayuki KUSUDA, Yoh SASAKI, Daisaku SUMIDA*

Global warming is an urgent issue worldwide and a use of renewable energy to curb greenhouse gas emission from power station is now seriously discussed. Research and development for the use of solar energy are carried out for more effective use of renewable energy.

Mitsui Engineering & Shipbuilding Co., Ltd. (MES) started its research and development of the Concentrated Solar Power (CSP) using solar energy in 2007, and constructed the CSP demonstration plant in Abu Dhabi, the United Arab Emirates in 2009. The solar receiver collects the heat from the sun, but the integrated heat received depends greatly on weather condition and sun position, and the design method of such solar receiver ought to be different from conventional one. In order to confirm the design condition of solar receiver and the integrity of the new design method, a performance test was carried out in 2011, where the actual solar energy was measured in a chronological order and compared with the corresponding change of the integrated energy to evaluate the efficiency of heat receiver etc. The result of the performance test well demonstrated the effectiveness of the solar receiver technology.

地球温暖化の防止は世界規模で議論されており、電力供給においても、温室効果ガスの発生を防止できる再生可能エネルギーの活用が推進されている。その一つとして、太陽エネルギーの利用は大きな有効手段であり、その研究開発が各国で行われている。

三井造船は、太陽エネルギーを利用した太陽熱発電(CSP)の研究開発を2007年から開始し、2009年にアラブ首長国連邦のアブダビに、ビームダウン型集光試験装置の建設を完了させ、2011年にこの装置を使用して太陽熱を集熱するためのレシーバ技術の実証試験を行った。CSPシステムに採用されるレシーバは、天候の状況や太陽の傾きの影響により得られる太陽エネルギーに変化があるため、従来の設計手法を適用することが難しく、新たな設計条件と設計手法の確立を目的として、性能実証試験を実施した。本実証試験では、実際の太陽光集光エネルギーを時間経緯で計測するとともに、それに対応した集熱エネルギーの変化を計測し、両者の比較により集熱効率などを評価した。本報では、この実証試験の内容と結果について報告する。



(a) 研究開発中の太陽熱発電設備の概念



(b) ビームダウン型集光試験装置

写真1 タワー型太陽熱発電設備の概念と集熱試験に使用したビームダウン型集光試験装置
 Conceptual Design of CSP by Tower and CSP by Beam Down used for Heat Collection Test

* エンジニアリング事業本部 第1設計部

** 機械・システム事業本部 産業機械設計部

*** 事業開発本部 再生可能エネルギープロジェクト部

**** 三井造船プラントエンジニアリング株式会社

***** エンジニアリング事業本部 事業開発部

1. はじめに

地球温暖化の防止は、今の世代が次の世代へ引き継ぐべき大きなテーマであり、世界規模での対応が模索されている。地球温暖化をもたらす、自然の生態系などに悪影響を及ぼす可能性がある大気中の温室効果ガス(二酸化炭素、一酸化二窒素など)の増加が人類共通の関心事であり、その排出低減が重要である。この解決策として、再生可能エネルギーの活用が言われており、太陽エネルギー利用は、その有効な一つの手段として、研究開発が各国で行われている。

三井造船は、再生可能エネルギーの利用技術の一つである太陽熱発電(Concentrated Solar Power: CSP)分野についての研究開発を2007年から開始し、2009年にアラブ首長国連邦のアブダビにCSP実証試験プラントを完成させた(写真1)。また、東京工業大学との共同による小型レシーバのベンチ試験などの各種の試験を経て、2011年に集光型太陽熱レシーバの性能実証試験(以下、本試験)を実施した。本報は、本試験とその結果について述べたものである。

CSPシステムについては、各国で各種の方式が提案され、既に商業機として稼働しているものもある。当社はタワー式のCSPシステムについて研究開発を続けており、今後世界の市場(2015年で、1500 MW規模¹⁾)へ展開すべくCSPシステムの構成技術の研究を継続実施中である。本試験では、アブダビに設置したビームダウン式CSPの実証機で性能評価を行ったが、集熱レシーバについてはタワー式CSPに対する性能評価にも適用できるものとする。

2. 実証試験の背景と目的

太陽光のエネルギー密度は、地上では1 m²当たり約1 kW程度(JISにおける波長0.305 ~ 4.045 μmに対する分光日射強度の定義)である。多数のヘリオスタットと呼ばれる太陽を自動追尾する反射鏡を用いて、太陽光の反射光を一点に集光させて高密度のエネルギー源として活用するシステムがCSPシステムである。CSPシステムにおいては、ヘリオスタットによって集光された太陽エネルギーを吸収するために、レシーバと呼ばれる熱吸収設備が用いられる。

CSPシステムでは、従来型の集熱レシーバの設計条件と異なり、受ける熱の条件が太陽からのエネルギーであるために、天候の状況や昼夜の影響を受け、従来の設計手法を適用することが難しく、新たな設計条件と設計手法の確立が必要となる。本試験は、これらを解決する目的で、集熱レシーバにアクセスが容易なビームダウン式CSP実証機で実施した。

ヘリオスタットでは季節や時刻によって変化する太陽の位置を追尾して、レシーバ表面上への入射熱量ができるだけ多くなるように集光されるが、レシーバ表面では入射熱量の密度に分布が生じる。したがって、この分布を正確に把握することが重要である。レシーバ表面では、太陽光固有の光エネルギーの吸収率をできるだけ高くし、かつ表面からの熱放射によるエネルギー損失を少なくして、レシーバの熱吸収効率を高くすることが重要である。

現在、世界で検討されているレシーバでは、熱媒として溶融

塩、水・蒸気、空気などが候補となっている。本試験では、溶融塩又は水・蒸気を想定した伝熱管型のレシーバを対象とし、レシーバの受熱面は鋼管で構成した鋼管の内部に熱媒を流し、これによって受熱面の冷却を図るとともに熱媒が受け取ったエネルギーを外部に取り出し、レシーバ出入口の温度差からその吸収熱量を評価してレシーバの熱効率を算定した。

一般的に、レシーバ中央部の熱流束は600 ~ 1000 kW/m²と高くなる。また、伝熱管の片面からのみの受熱となるため、伝熱管壁の周方向に温度分布を生じる。したがって、レシーバの設計では、伝熱性能の評価、伝熱管の強度評価、熱疲労評価などを行うために、伝熱管の管壁温度を正しく予測する技術が必要である。

これらの課題についてレシーバに特有の設計手法を検証するために、アブダビに建設された定格100 kWの太陽光集光試験設備²⁾(以下、本設備)を用いて本試験を行った。本設備は、当社が2009年に建設したものであり、反射鏡については、コニカミノルタオプト株式会社と共同研究で開発した。

3. 実証試験に用いた設備の概要

本試験は、太陽光集光試験設備、レシーバ試験設備及び測定装置を用いた。

3.1 太陽光集光試験設備

試験に用いた本設備の概要を図1に示す³⁾。これは、ヘリオスタット、セントラルリフレクター及びレシーバの全体立面を示したものである。本設備はビームダウン方式と呼ばれるタワー式CSPシステムの一つで、同心円状に配置されたヘリオスタットで集光された太陽光は、設備中央上部に設けられたセントラルリフレクターと呼ばれる反射鏡で2次反射されて、地上に設置したレシーバ表面に照射される。図1の中央部下方のレシーバ位置に、本試験用のレシーバを設置して試験を行った。試験で使用したヘリオスタットを写真2に示す。

3.2 レシーバ試験設備

レシーバ試験設備の系統図を図2に示す。熱媒は溶融塩を模擬した熱媒油ダウサムA(DowthermA[®])を用いた。熱媒貯槽に充填された熱媒は熱媒循環ポンプを経てレシーバに入り、太陽光で加熱される。ここで高温となった熱媒は、エアフィンクーラで冷却されて熱媒貯槽に還流する。レシーバ吸収熱量は、熱媒流量とレシーバ出入口の温度差から求めた。

本試験用のレシーバ受熱面は、1500 mm × 1500 mmの平面内に鋼管を平行かつ密に配置して構成した。レシーバの組立図を図3に、外観を写真3に示す。伝熱管の受熱側とその裏側に熱電対を取り付け、それぞれの温度を測定して受光面の熱流束と管壁温度の関係を調べた。また、管内熱媒温度を管の長手方向に沿って測定し、熱流束分布と吸収熱量の関係についても調べた。

レシーバ受熱面を図3に示すようにA面とB面の2つのエリアに分割し、それぞれの面に太陽光の反射率を下げるための表面処理を行い、処理法の違いによる光学的性能を評価した。

3.3 測定装置

3.3.1 気象データ観測装置

CSPシステムは気象条件に大きく影響される。特に、直

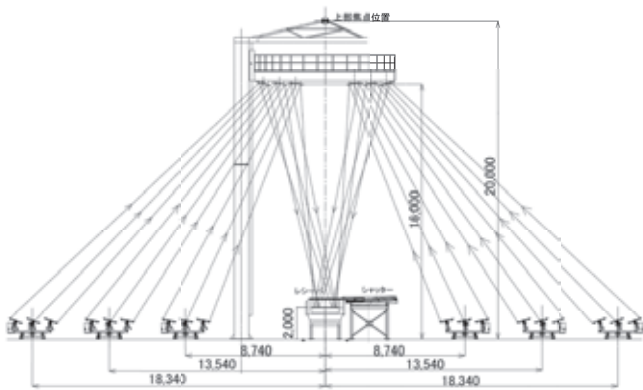


図1 試験設備の全体配置
General Arrangement of CSP Demonstration Plant



写真2 ヘリオスタット
Heliostat

達日射強度(Direct Normal Irradiation : DNI)はCSPシステムの出力に大きく影響する。さらに、湿度、風速、風向なども安定運転には重要な気象条件である。このほか、全日射量、気温などを含む気象データの観測装置を本設備エリア内に設置して、太陽熱吸収熱量との関連を調べた。

3.3.2 入射熱量測定装置

レシーバに入射する太陽エネルギーは、気象条件以外のパラメータ、すなわち、太陽の位置、ヘリオスタットの鏡の反射率や鏡面の面精度及び角度精度などによって変わってくる。

さらに、レシーバ受熱面に入射する熱流束には強度分布がある。したがって、レシーバの性能を把握するためには、吸収熱量の測定時にレシーバに入射した熱流束分布をほぼ同時に知る必要がある。このために、熱流束計とCCDカメラを用いてレシーバ表面の入射熱流束分布を測定する方法⁴⁾を採用した。

なお、本試験では、入射熱流束を測定するために、ガードン熱流束計を用いた装置を考案した。ガードン熱流束計は、写真4に示すように、レシーバ上部にタイルを敷いた可動式シャッターを設置し、その端部に9個設置した。

本装置による入射熱流束の測定では、まずレシーバ上部をシャッターで覆い、セントラルリフレクターの中心部に設置したCCDカメラでタイル上面の輝度分布を計測した。その

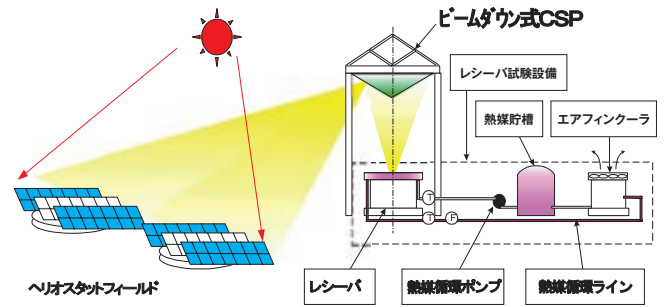


図2 試験設備系統図
Outline Process Flow of CSP Demonstration Plant

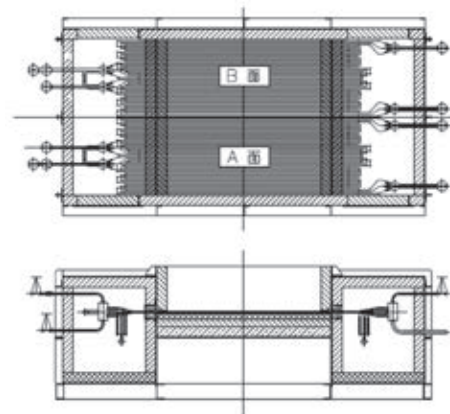


図3 レシーバ組立図
Assembly of Receiver

後、順次シャッターを開放しながら9個のガードン熱流束計の位置を変化させて局所の入射熱流束を計測し、輝度分布と入射熱流束のデータを対比させて、レシーバに入射した熱流束を求めるための評価式を作成した。

4. 実証試験結果

4.1 実証試験の概要

本試験では、まず、アブダビ現地の天候、DNIやその時刻変化などの試験条件を把握するための試験を行い、さらにレシーバ入射熱量及び吸収熱量の測定を行った。また、その結果について数値解析を行い、試験結果との整合性についても確認した。また、レシーバ受熱面の表面処理の効果についても確認した。写真5に実証試験時の集光状況の一例を示す。

4.2 DNIの測定結果

本設備を設置した場所における天候状態、時刻とDNIの関係性を測定した。その一例を図4及び写真6に示す。なお、写真6に付記した天候変動時の時刻は、図4の天候変動時の曲線の時刻に対応する時刻である。完全に晴れ渡った天候安定状態ではDNIは1日を通じて安定的に推移するが、うすい雲が散在する状態ではDNIは激しく変化することが確認された。このような変動があることを前提として、CSPシステムの全体設計を行う必要がある。また、この変動はCSPシステムの出力に直接影響するため、安定的な電力供給のためには適切な熱容量を有する蓄熱設備の付加が必要と考えられる。



写真3 レシーバ外觀
Receiver

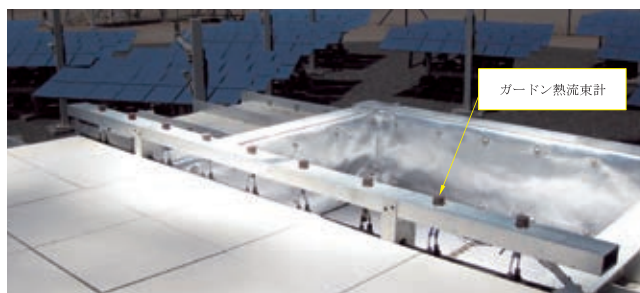


写真4 ガードン熱流束計による入射熱流束の測定状況
Measurement of Heat Flux by Gardon Flux Meter



写真5 集光試験状況
Experiment of Concentrated Sunlight

4.3 1日のDNI 吸収熱量の変化

1日を通して天候が安定している日のDNIとレシーバ吸収熱量を測定した結果の一例を図5に示す。朝及び夕方DNIは、エアマスの影響で日中に比べて低くなる。エアマスとは、太陽光が大気層に垂直に入射したときに対する、斜めに大気層を通過する長さの比である。測定結果から朝及び夕方のレシーバ吸収熱量は、太陽に対するヘリオスタットの相対角度等の影響でDNIの低下量よりも、更に少なくなることが確認された。

4.4 入射熱量の測定結果

CCDカメラで計測した、レシーバ上面タイルの表面輝度の測定結果の一例を図6に示す。また、ガードン熱流束計で測定した値とCCDカメラで計測したシャッター上のタイルの表面輝度の関係を図7に示す。熱流束と輝度の間には、比例関係があることを確認した。この比例定数を用いて、タイル表

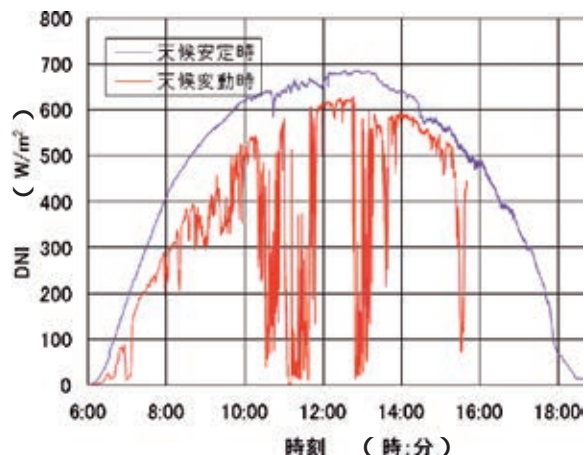


図4 天候状態、時刻とDNIの関係
Relation between DNI and Weather Condition and Time



天候安定時



天候変動時(10:40)



天候変動時(11:20)

写真6 天候安定時と変動時の空の状態
(時刻は、図4の変動時時刻を示す)
Clear Sky and Cloudy Sky at Plant Site

面への入射熱流束分布を求めた。計測結果の一例を図8に示す。時刻が推移しても集光中心はほとんど移動していないことが確認できた。なお、図6に示す反射輝度は受光面の反射率や散乱の影響を受けるため、図7に示す熱流束と輝度の関係は本設備に固有の関係である。また、CCDカメラによる測定輝度は可視光の範囲を測定しているため、時刻や天候条件などによる太陽光の分光スペクトルの変化の影響が誤差要因として含まれるが、本試験ではこれによる誤差は無視した。

4.5 入射熱量の測定結果と計算結果の比較

4.5.1 太陽熱吸収面への入射熱量の測定法

4.4では、シャッター上部に設置したタイルを用いて入射熱量を測定する方法について述べた。伝熱管によって構成される太陽熱吸収面(受熱面)は、タイルとは表面反射率が大幅に異なるが、伝熱面への入射熱量もこれと同様の方法で測定することが可能である。しかしながら、この方法では計測が煩雑になるので近似的に以下の方法を用いた。

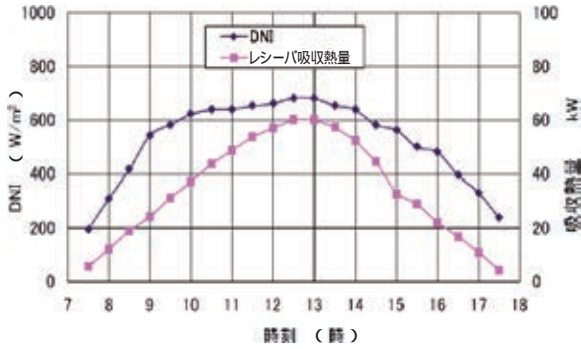


図5 1日におけるDNIとレシーバ受熱量の測定結果の一例
Example of Transition of DNI and Heat Absorption of the Receiver in a Day

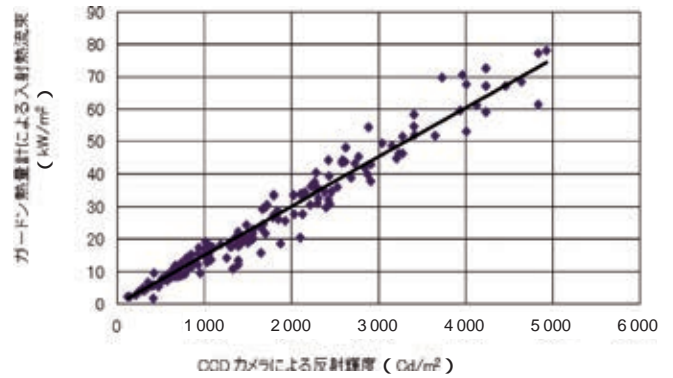


図7 入射熱流束とタイル表面の反射輝度の関係
Correlation of Heat Flux Data by Gardon Flux Meter and Luminance Data by CCD Camera

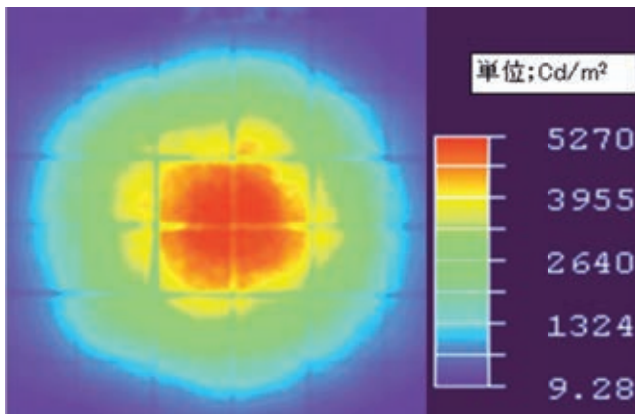


図6 CCDカメラによるレシーバ上面タイルの輝度測定結果の一例
Example of Luminance Data by CCD Camera

まず、タイル表面の反射輝度(BT)の測定と同様の方法で、CCDカメラによりレシーバ受熱面の反射輝度(BR)を測定する。この測定値と4.4で求めたタイル表面の反射輝度との比を求め、これを輝度換算係数(BF)と定義すると、BFは式(1)で表される。

$$BF = BT/BR \dots\dots\dots(1)$$

受熱面上のCCDカメラの測定値に、BFを乗じた値をタイル表面の反射輝度に置き換えて、受熱面への入射熱量とした。このようにして求めたBFの受熱面上の分布の一例を図9に示す。

受熱面の輝度分布は、例えば図6に示すように中央部が高く、周辺部では低い値で、その差は大きい。図9のBFは中央部も周辺部もほぼ同一の値となっている。

したがって、BFを用いて求めた受熱面への入射熱流束は実用上問題ない値であると考えられる。なお、受熱面表面は伝熱管で構成された凹凸のある表面であるため、光の反射特性はタイル表面とは異なり、CCDカメラで測定した反射輝度はタイル表面の反射輝度とは局所的には異なった特性を示す可能性がある。しかし、タイルと受熱面の輝度の測定条件が等しいときには、BFはほぼ同一となるので、性能評価上問題ないと判断した。

なお、図9のA面とB面では伝熱管の表面処理法が異なるため受熱面の反射率が異なり、そのためにBFの値に違い

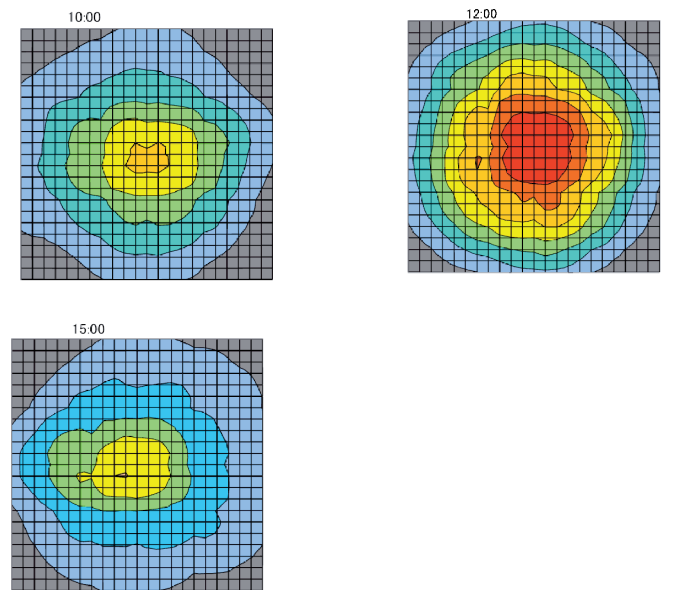


図8 入射熱流束分布測定結果の一例
Examples of Heat Input Distribution on Tile Surface of the Receiver Shutter

がある。すなわち、B面のBFはA面のそれよりも大きい値となっている。これはB面の反射輝度がA面のそれよりも小さいことを意味しており、反射損失はB面の方がA面よりも少ないことを示している。

4.5.2 受熱面の吸収熱量の算出方法

レシーバ実機的设计では、ヘリオスタットの反射光を積分した結果としての入射熱量が与えられた場合に、これに対するレシーバでの吸収熱量とレシーバ伝熱管温度を正確に予測することが必要である。そのため、受熱面への入射熱流束と吸収熱量の関係について数値解析を行った。この解析で採用したアルゴリズムの概要を以下に示す。

伝熱管への入射熱流束は、図8に示すような分布を持っている。したがって、伝熱管各部での伝熱量や管壁の温度などは、局所の熱流束と管壁内の熱移動や管内の熱媒温度を考慮すれば求めることができる。本解析で用いた熱バランス模式図を図10に示す。伝熱管を管軸直角方向に微小区間に分割して、微小区間毎に、実測で得られた入射熱量を与え、熱

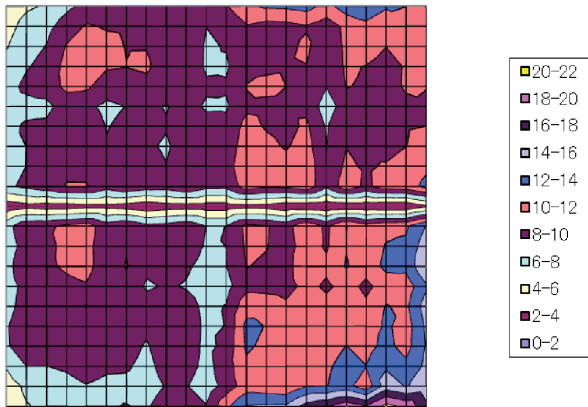


図9 受熱面表面の輝度換算係数(BF)の測定結果
Example of Luminance Distribution Data on Heat Surface of the Receiver

損失を含む熱移動を考慮して微小区間でエネルギーの釣り合いが成立するように内部熱媒温度の上昇を求め、これを伝熱管全長に亘って積分して、全体の吸収熱量とレシーバ伝熱管温度分布を求めた。この関係式を式(2)に示す。

$$Q_f = Q_{fo} - Q_{fi} = Q_{ri} - (L_e + L_r + L_c) \dots\dots(2)$$

ここに、

- Q_f : 内部熱媒吸収熱量
- Q_{fo} : 内部熱媒の微小区間長さ からの流出熱量
- Q_{fi} : 内部熱媒の微小区間長さ への流入熱量
- Q_{ri} : 太陽熱の伝熱管表面への放射伝熱による入射熱量(図8に示すような局所熱流束の測定値に基づいて求めた局所入射熱量)
- L_e : 伝熱管表面からの放射損失(伝熱管表面の放射率と計算で求めた表面温度により求めた値)
- L_r : 伝熱管表面からの反射損失(伝熱管表面の反射率を用いて計算で求めた値)
- L_c : 伝熱管表面からの対流損失(対流熱伝達による。外部風速等に影響される)
- : 伝熱管の微小区間長さ

このうち、反射率と放射率は伝熱管表面の処理法によって決まる値で、別途、実測によって求めた値を用いた。なお、放射損失の計算に当たっては、伝熱面を構成する並列管間の形態係数を考慮した。また、管壁から管内熱媒への伝熱量は、管内強制対流熱伝達率と管壁温度と管内熱媒の温度差から求めた。受熱面では太陽エネルギーが伝熱管片面からのみ入るので管壁管周方向に熱移動が生じ、管壁温度に分布が生じる。熱媒と管壁温度の温度差も考慮した。また、実際には管壁における管軸方向の熱移動が生じるが、他の熱移動量に比べて小さいので、式(2)では省略した。

4.5.3 数値解析結果と実測結果の比較

4.5.2の手法によって実測の入射熱流束分布から求めたレ

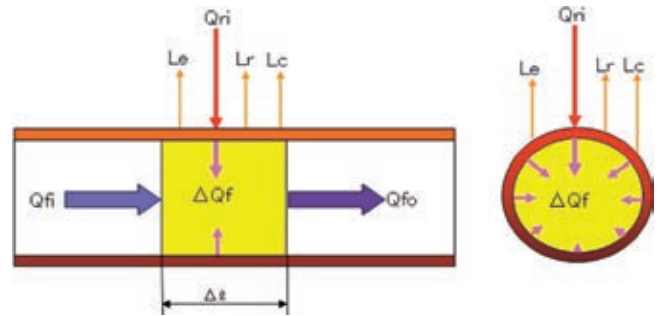


図10 分割微小区間における熱バランス模式図
Heat Balance of Heat Transfer inside Tube

シーバ受熱量(解析値)と、レシーバ出入口温度差の実測によって求めたレシーバ受熱量(実測値)の比較の一例を図11に、伝熱管長手方向の管内熱媒温度と管外表面温度の解析値と測定値を比較した結果の一例を図12に示す。図11及び図12に示すように、実測値と解析値は良く一致しており、本解析方法は妥当であると考えられる。

4.6 受熱面表面処理法の伝熱性能への影響評価

受熱面の伝熱性能は、表面の反射率や放射率によって影響される。本試験では図3に示すように受熱面をA面とB面に分け、それぞれに異なる表面処理を施してそれぞれの性能を評価した。

A面とB面の吸収熱量を比較した結果の一例を図13に示す。データには若干のバラツキはあるものの、B面の方がA面よりも約5%程度伝熱性能が良い。これにより、表面処理はB面に施した方法によるのが良いことが確認された。この性能の差は、表面処理材の事前評価で予測した値とほぼ同程度であったことから、表面処理材の性能予測法は適正であることが確認された。今後、耐久性の確認を加味した上で、採用する表面処理法を決定する方針である。

5. 今後の課題

溶融塩又は水・蒸気を想定した熱媒油を用いた試験により、伝熱管型のCSPレシーバを設計するための必要な技術を取得でき、今後の設計思想を固めることができた。しかしながら、今後のCSPでは、より高温を得られる熱媒を使用したタワー式が、高効率なシステムとして主流になると考えられるため、本試験で得られた知見を基に、より高温の熱媒に対応したレシーバ技術の確立が必要になると考えている。また、太陽エネルギーを電力に変換し、系統連係に安定供給するためには、日中の天候変動が生じて電力などを安定的に供給するための技術も重要となる。これには、取得した太陽エネルギーを熱エネルギーとして貯蔵し、受熱量の変動を緩和する蓄熱技術が必要となる。

特に後者は、日中の太陽エネルギーを貯蔵しておき、需要に応じてその貯蔵エネルギーを取り出すことができるため、CSPによる太陽エネルギーの夜間利用も可能とするものであり、最重要課題である。

したがって、CSP技術の今後の展開としては、高温の蓄熱

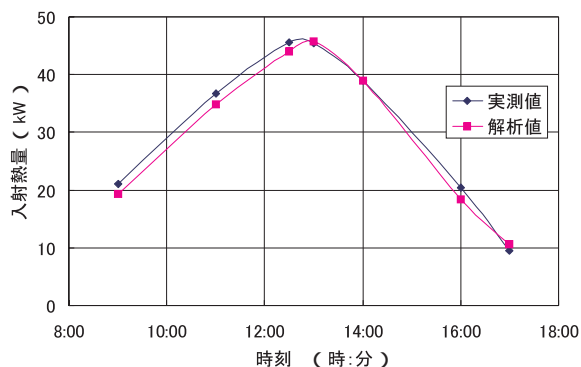


図 11 レシーバ受熱量の実測値と解析値の比較例
Comparison between Input Heat Capacity Calculated from Measured Heat Absorption and Measured Input Heat Capacity

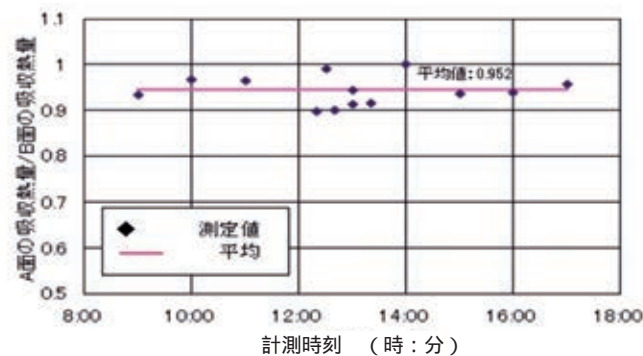


図 13 受熱面表面処理法の伝熱性能への影響評価
Evaluation of Effect to Heat Transfer Performance Receiver Heat Surface Treatment

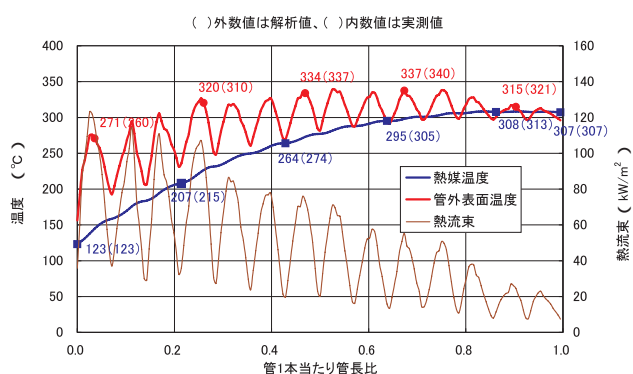


図 12 管壁温度、熱媒温度の解析値と実測値との比較
Comparison between Calculated Tube Skin Temperature based on Measured Input Heat Capacity and Measured Tube Skin Temperature

に適した熱媒を取り扱うことができるレシーバ技術の確立と、蓄熱技術の研究開発が同時に必要となる。現在、世界各国でこれらの技術に関して熾烈な開発競争が展開されているが、当社もこの方向を目指して、レシーバを含めた技術開発を進める予定である。

6. おわりに

当社では、本報で記したアブダビにおけるビームダウン方式 CSP 実験での研究開発の他に、CSP システムにおける各種の要素技術の開発を行っている。一方、商業機の市場投入の前に、2011 年に JETRO 公募のインドにおける CSP システムの FS 事業への参画、また 2011 年の NEDO 公募のインドにおける太陽熱発電技術導入可能性調査への参画、更に同年のチュニジアにおける太陽熱複合発電設備の実施可能性調査への参画を行っている。

今、世界的に化石エネルギーや原子力エネルギーからの代替エネルギーの導入が模索されており、太陽エネルギーの効率的な活用が脚光を浴びている。当社では、再生可能エネルギー技術の中核となるように CSP システムの技術開発、事業推進を進めていく所存である。

最後に、コスモ石油株式会社、MASDAR、MIST 及びコ

ニカミノルタオプト株式会社より頂いたご支援に対し、感謝の意を表する。

参考文献

- 1) Emerging Energy Research : Global Concentrated Solar Power Markets and Strategies 2010-2025, p. 3
- 2) H. Hasuike, et al. : DEVELOPMENT OF TOKYO TECH BEAM-DOWN SOLAR CONCENTRATION POWER SYSTEM, Solar Paces 2009, Paper_16437,(2009)
- 3) 塚田 : 太陽熱発電実証プラント - 技術開発を進め実証試験により性能を確認 - , 三井造船技報 , 204(2011-10) , p. 27
- 4) S.A. Meyers, et al : DEVELOPMENT OF A CORRELATION BETWEEN LUMINOUS INTENSITY AND SOLAR FLUX FOR THE BEAM-DOWN TOWER CONFIGURATION, Solar Paces 2010, Topic11-0100,(2010)

〔問い合わせ先〕

事業開発本部 再生可能エネルギープロジェクト部
TEL 03 - 3544 - 3043 塚田 純



安藤 善一



友保 純直



筒井 伸幸



江澤 一明



酒井 章次



楠田 雅之



佐々木 庸



角田 大作

流力振動を利用した水流発電技術の有効性検証

林 健 一* 比江島 慎 二** 岡 圭 人*** 井 上 浩 男*

Investigating Possibility of Hydroelectric Power Generation based on Flow Induced Vibration

Ken-ichi HAYASHI, Shinji HEIJIMA, Keito OKA, Hiroo INOUE

Mitsui Engineering & Shipbuilding Co., Ltd. and Okayama University are developing the hydroelectric power generation based on the flow induced vibration of an inverted pendulum. The main body of the inverted pendulum is a circular cylinder filled with air, and buoyant force acts on the cylinder body as a restoring force. This buoyant force sustains the pendulum vibration without any spring system. We investigate torque, power and energy efficiency of the flow induced vibration of an inverted pendulum through the experiment at a circulating water channel. It is found that the flow induced vibration of the inverted pendulum can extract the hydrokinetic energy quite efficiently.

三井造船は、岡山大学と共同で、新しい水流発電技術を開発している。これは、倒立振り子の流力振動を用いた潮流発電の開発に向けた取り組みである。この概念を検証するために、(株)三井造船昭島研究所で回流水槽を使用した振動実験を行い、倒立振り子の流力振動によるトルク・仕事率・エネルギー取得率などの発電に重要な力学特性データを求めた。その結果、トルクと仕事率は円柱振り子の直径によらず、振り子長さで決まる傾向があり、それぞれ振り子長さの2.7乗と2.3乗に比例することが明らかになった。また、トルクと仕事率は流速が速いほど増大し、仕事率は流速のほぼ3乗に比例した。さらに、振り子のアスペクト比が大きいほどエネルギー取得率が高くなり、最大で55%の取得率が得られた。本報では、試験によって得られた、これらの特性データについて報告する。

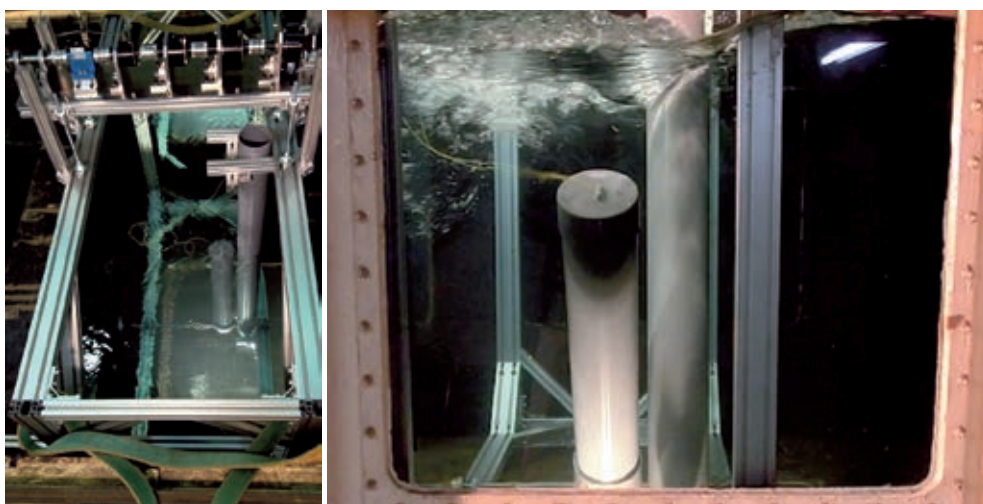


写真1 倒立振り子の流力振動
Flow Induced Vibration of Inverted Pendulum

* 技術開発本部 技術総括部

** 岡山大学 大学院環境生命科学研究科

*** 岡山大学 大学院環境学研究科

1. はじめに

2011年3月11日の東日本大震災と、その後の福島第一原子力発電所の事故を受けて、再生可能エネルギーへの転換が急務となっている。現在、特に風力や太陽光に注目が集まっているが、これらは天候による変動の影響を受けるため、安定した電力供給源としては課題がある。これに対し、自然エネルギーを利用した再生可能エネルギーの中で、地熱、地中熱、海洋エネルギーなどは安定してエネルギー供給が可能と考えられている。

海洋エネルギーの一つである潮流も、風力や太陽光に対し、天候による変動の影響を受けにくい。さらに、空気と比べて水の密度は1000倍程大きいことから、低速でも風力と同等以上の発電を期待できる安定したエネルギー源であると考えられる。例えば、瀬戸内海の鳴門、来島、関門などの海峡の潮流は最大5 m/sに達し、これは巨大な台風の50 m/sの風に匹敵する。

三井造船は、この潮流の利用を最終目標とする新たな発電技術を岡山大学と共同で開発している。この度、本技術に基づく試験装置を製作し水槽試験を行って、その有効性を確認した。本報では、その試験結果の概要を報告する。

2. 流れ場から回転軸力への変換メカニズム

水流を利用した発電技術に水力発電がある。これは、水流で3翼プロペラ式やダリウス式などの水車を回して回転軸力に変換して、発電機を回す方式である。一方、当社と岡山大学が開発中の技術は、これと全く異なる方式で、流れ場に置かれた振動体が振動する、いわゆる流力振動によるエネルギーを利用する。

本技術の特長は、内部に空気を閉じ込めた中空円柱を水中に沈め、その下端を回転軸に取り付けることにより、円柱に作用する浮力が復元力となる倒立振り子方式の振動体にある。これは、図1に示すように、円柱1本だけで構成され、バネ等を必要としない極めてシンプルな構造である。

この振動体を水流中に設置したとき、水流と直角方向に渦

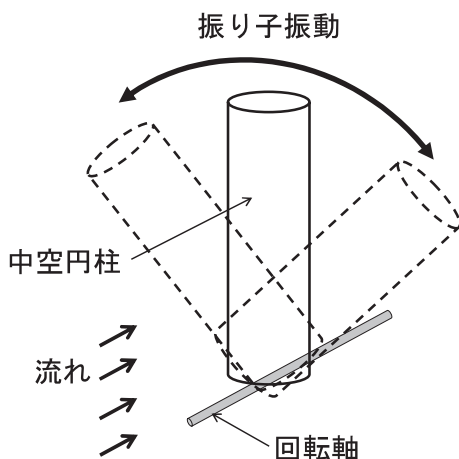


図1 倒立振り子の概念図
Concept of Inverted Pendulum

励振と思われる流力振動が観測された。さらに、倒立振り子上流に固定円柱を近接して設置すると、倒立振り子単独の場合よりも広い流速範囲で、ウェークギャロッピングと思われる大振幅の流力振動を発生させることにも成功した¹⁾²⁾。そこで、この現象の基本特性を把握するための水槽試験を行い、本振動体におけるトルク、仕事率、エネルギー取得率などを求めた。

3. 水槽試験

倒立振り子の円柱には市販の塩ビ管を用い、両端を専用キャップで密封して空気の漏れを防いだ。倒立振り子は直径D=75 mm, 115 mm, 165 mmの3種類と長さL=500 mm, 700mm, 900mmの3種類の組み合わせで合計9種類を用いた。

試験装置の外観を写真1及び写真2に示す。倒立振り子の回転軸と上流固定円柱は、アルミ製のフレーム構造で支持した。また、上流固定円柱と倒立振り子は互いに接触しない程度に近づけた。倒立振り子の試験条件を表1に示す。

回転軸の往復運動をプーリとタイミングベルトでフレーム構造上部のトルク計測部に伝達した。トルク計測部を写真3に、その仕様を表2に示す。試験は(株)三井造船昭島研究所の回流水槽(測定部長さ5.5 m×幅2 m×水深1.2 m)を使用して行い、0.1 m/s刻みの各流速で様々なトルク負荷を与え、各流速で得られる最大仕事率等を調べた。トルクと角度の測定例を図2と図3に示す。

図4に示した、トルクT(t)と角速度 $\dot{\theta}(t)$ を乗じて得られる仕事率P(t)の時刻歴から二乗平均平方根(Root Mean Square: RMS)値Pを算出した。同時に、トルクセンサーで計測したトルクをプーリギヤ比に応じて倒立振り子回転軸でのトルクに変換し、そのRMS値Tを求めた。

さらに、単位時間に倒立振り子の投影面積D×Lに流入す

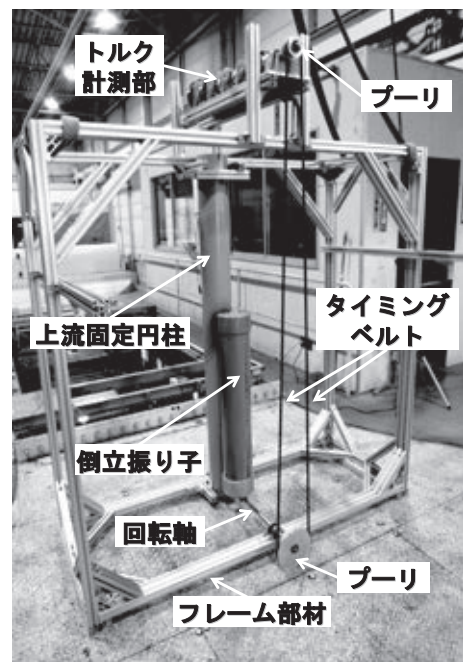


写真2 試験装置全体
Testing Apparatus of Inverted Pendulum System

表1 倒立振り子の試験条件
Experiment Data of Inverted Pendulum

| 倒立振り子 直径 (mm) | 倒立振り子 長さ (mm) | 上流固定 円柱直径 (mm) | 円柱隙間 (mm) | 流速範囲 (m/s) |
|---------------------|---------------------|----------------------|--------------|---------------|
| 75 | 500 | 75 | 15 | 0.3 ~ 0.8 |
| | 700 | | | |
| | 900 | | | |
| 115 | 500 | 115 | 20 | 0.4 ~ 1.1 |
| | 700 | | | |
| | 900 | | | |
| 165 | 500 | 165 | 25 | 0.4 ~ 1.3 |
| | 700 | | | |
| | 900 | | | |

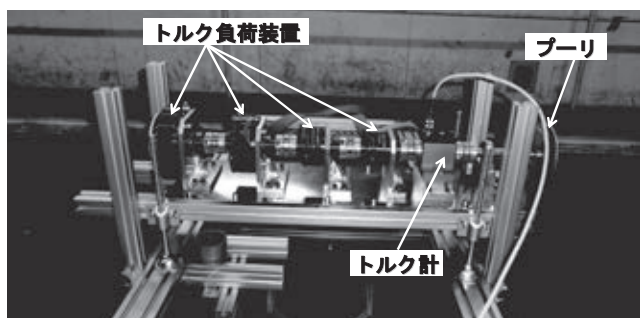


写真3 トルク計測部
Measuring Unit of Torque

表2 計測器リスト
Instrumentation List

| 項目 | トルク調整または 測定範囲 (N・m) | 型式 |
|-------|---------------------------|------------------------|
| トルク制御 | 0.03 ~ 0.45 | (株)工進製作所 パーマトルク HC3-3J |
| | 0.06 ~ 1.3 | " " HC4-4J |
| | 0.12 ~ 3.2 | " " HC5-5J |
| | 0.23 ~ 6.3 | " " HC6-1J |
| トルク計測 | 0 ~ 10 | ローレンツ社 非接触回転 DR-2212-R |

る水流の運動エネルギーに対する、倒立振り子の運動で取得したエネルギーの割合を示すエネルギー取得率を式(1)より算出した。

$$= P \left(\frac{1}{2} DLU^3 \right) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 ρ は水の密度、 U は流速である。したがって、 P は倒立振り子の流れ方向投影面に単位時間に流入する流体エネルギーに対する P の割合に相当する。

4. 励起される倒立振り子振動の測定結果

円柱直径 D 及び円柱長さ L ごとに各流速で得られた最大の仕事率 P とそのときの回転軸トルク T 、エネルギー取得率をまとめた結果を図5 ~ 図7に示す。

倒立振り子は一種のてこであり、同一 D では L が大きい

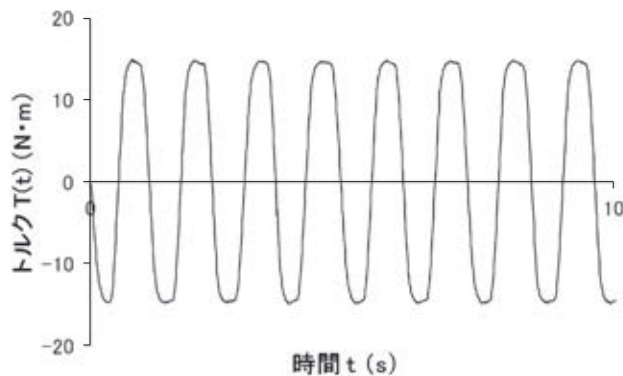


図2 トルクの時刻歴波形例
Example of Time History of Torque

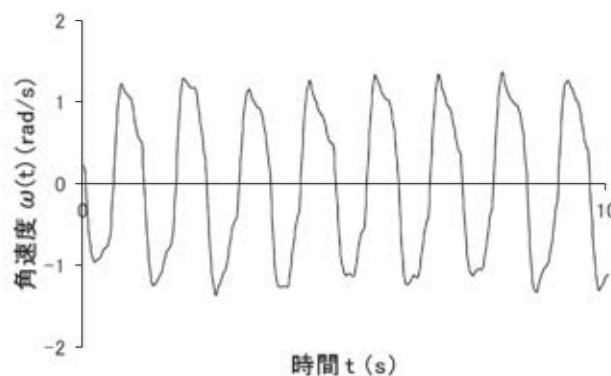


図3 角速度の時刻歴波形例
Example of Time History of Angular Velocity

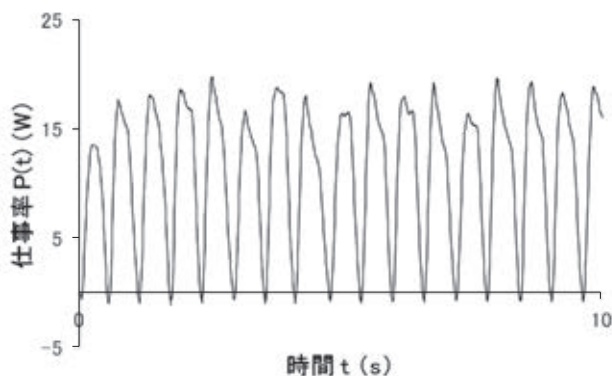


図4 仕事率の時刻歴波形例
Example of Time History of Power

ほど T が増加しており(図6上段)、 P も同様に L の増加とともに増加する(図5上段)。 U 、 D が同一で L が異なるケースの比較から、 T 、 P はそれぞれ L の2.7乗と2.3乗に比例することが明らかとなった。一方、 L が同一のときは D による T 、 P の変化はそれほど大きくないことから(図5下段)、 T 、 P は D によらず L で決まる傾向がある。 T 、 P はいずれのケースも流速 U とともに増加しているが、同一 L の下では P はおよそ U の3乗で増大している。

同一 L では D によらず P がほぼ等しいので、 D が小さくて振り子投影面に流入する流体エネルギーが小さいほど P が

高くなる傾向が見られる(図7下段). また, 振り子投影面に流入する流体エネルギーはLに比例し, PはLの2.3乗に比例するため, はLの1.3乗に比例することになるが, のグラフによれば, やはり同一DではLが長いほどが高くなる傾向がある. これらの結果から, Dが小さくLが長い, すなわち, 振り子のアスペクト比が大きいほどは高くなると言える. 図7に示したとおり, Lが700mmのときにDが75mm, Uが0.7m/sで最大のエネルギー取得率 = 55%

が得られたが, Uを更に速くすればより高いが得られるようにも思われる.

本実験において, DとLの組合せが(75mm, 900mm), (115mm, 700mm)及び(115mm, 900mm)の3ケースでは, それぞれ最大流速で, 非常に大きな励振力が生じたためトルク制御装置のトルク負荷が不足した. このため最大仕事率の探索が充分にできず, ここには更に高いPやが得られる余地が残されている.

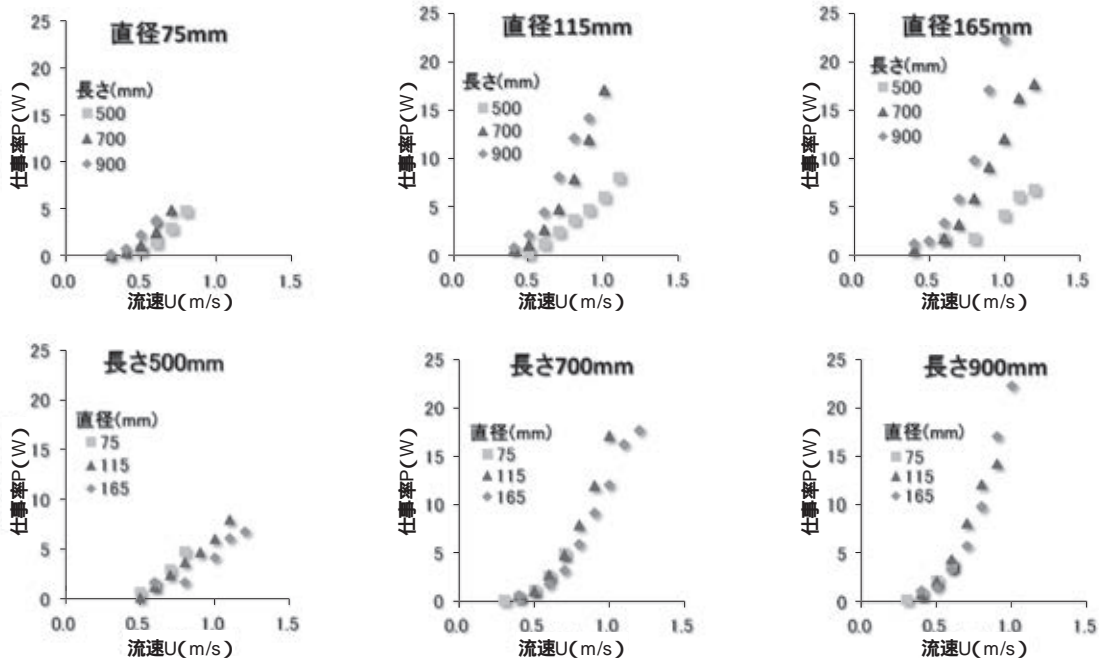


図5 倒立振り子振動時の仕事率
Power of Flow Induced Vibration of Inverted Pendulum

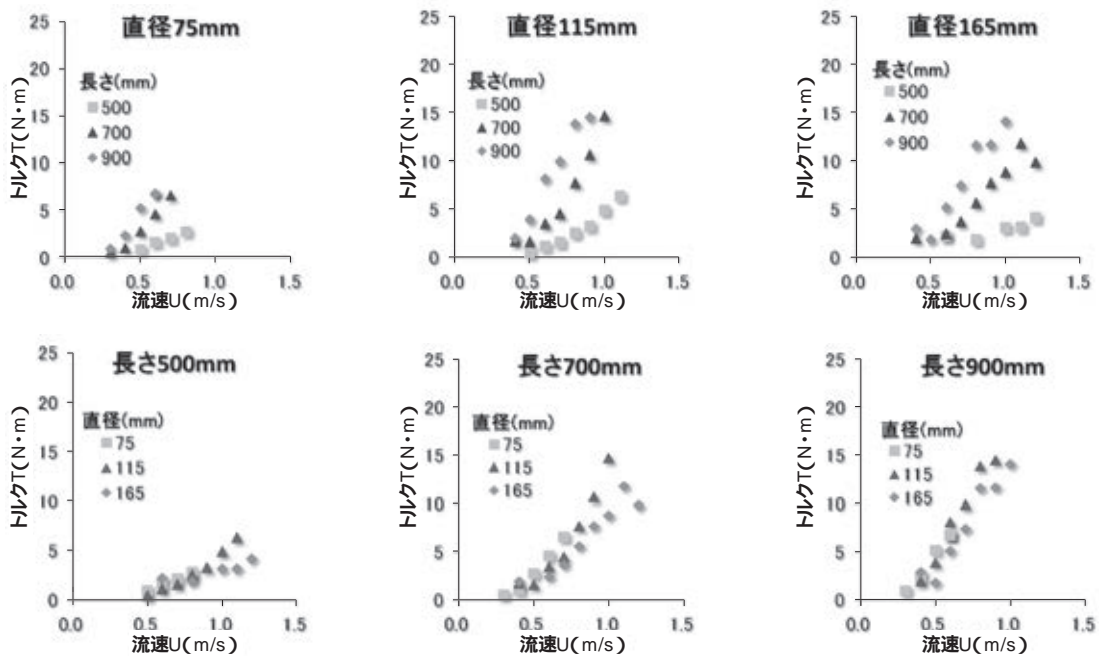


図6 倒立振り子振動時の回転軸トルク
Torque of Flow Induced Vibration of Inverted Pendulum

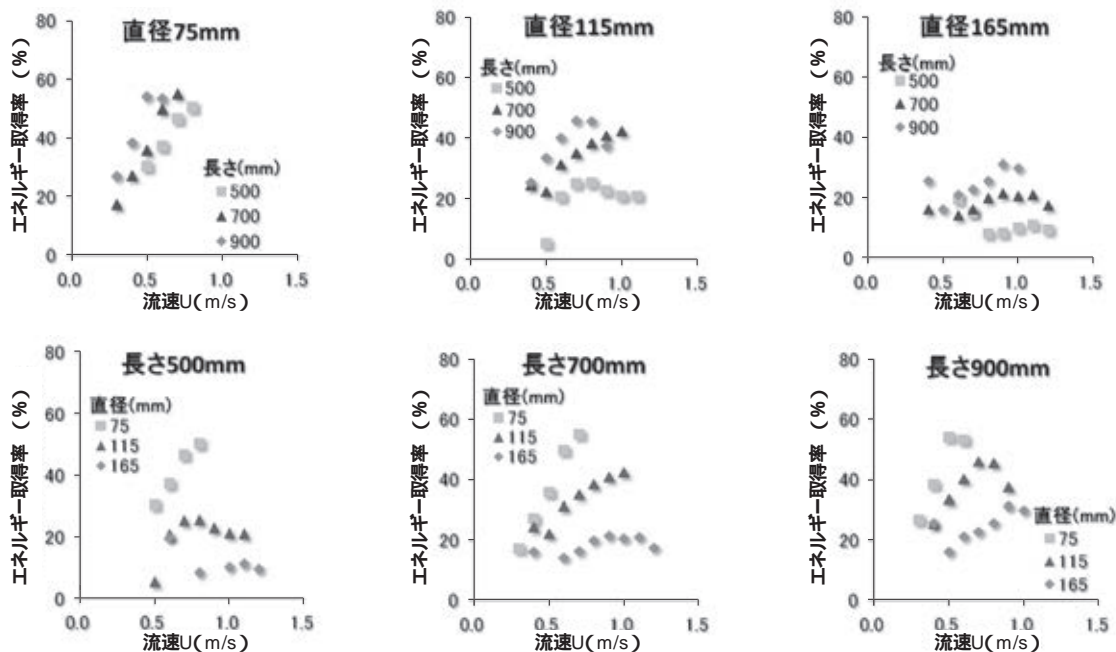


図7 倒立振り子振動時のエネルギー取得率
Energy efficiency of Flow Induced Vibration of Inverted Pendulum

5. 実用化の見通し

流力振動を利用した倒立振り子は高い発電性能を有しながら、構造が単純かつコンパクトであるため、低コストの潮流発電が期待できることが分かった。

本試験結果を基に、実機を想定した潮流発電の発電量を見積もると、図5より、流速Uが1.0 m/sで長さLが900 mmの倒立振り子の仕事率は23.7 Wであり、仕事率は長さLの2.3乗に、流速Uの3乗に比例することから、例えば、流速5 m/sの潮流に長さ20 mの倒立振り子を設置すると仕事率は3700 kWとなる。これは、直径100 m超の大型風車に匹敵するものである。

今後は、倒立振り子の往復回転振動から効率的に発電できる機構の開発が実用化を図る上での技術的課題となる。

6. おわりに

極めて単純な構造ゆえ、低コストで高耐久性が期待できる倒立振り子を用いた流力振動による発電を実現するため、流力振動で得られる回転軸トルク、仕事率、性能係数などの力学特性を水槽試験により求め、以下の知見を得た。

- (1) 回転軸トルクと仕事率は、振り子直径によらず、振り子長さで決まり、それぞれ振り子長さのおよそ2.7乗と2.3乗に比例する。
- (2) 回転軸トルクと仕事率は流速が速いほど増大し、長さの比較的長い振り子では仕事率は流速のほぼ3乗に比例する。
- (3) アスペクト比が大きい振り子ほどエネルギー取得率が高くなり、最大で55%に達し、それ以上となる可能性があることも分かった。なお、その後の追加試験では、80%近い驚異的なエネルギー取得率が得られている³⁾。

なお、本研究は、当社と岡山大学の包括的研究協力に関する共同研究「瀬戸内海の潮流を利用した発電技術の開発」の一環として実施されたものである。

参考文献

- 1) 林・外：並列ケーブル振動時における振幅依存性について、第13回 風工学シンポジウム論文集、(1994)、p. 245
- 2) 比江島・外：流体励起振動を利用した潮流発電のための基礎的実験、「フラッターの制御と利用」に関する第1回シンポジウム講演論文集、(2011)、p. 88
- 3) 「投稿中」比江島・外：倒立振り子の流力振動を用いた発電のための基礎的実験、土木学会論文集

〔問い合わせ先〕

技術開発本部 技術総括部
TEL 03 - 3544 - 3246 林 健一



林 健一 比江島慎二 岡 圭人 井上 浩男

素反応解析技術を用いた バイオマス由来ガス組成推算技術の開発

宮地 健* 片桐 学* 藤田 理人*
神田 伸靖** 則 永行庸***

Estimation Method of Gas Composition from Biomass by Detailed Chemical Kinetic Modeling

Ken MIYACHI, Manabu KATAGIRI, Masato FUJITA, Nobuyasu KANDA, Koyo NORINAGA

Mitsui Engineering & Shipbuilding Co., Ltd. aims to establish an estimation method of gas composition at an outlet of a gasifier, by means of gas-phase reaction of pyrolysis volatiles derived from biomass, by applying a detailed chemical kinetic modeling. In our previous report¹⁾, the identification of tar components in pyrolysis volatiles from grass-biomass was described, which were applicable as input data for the detailed chemical kinetic analysis.

In this report, the tar components in the pyrolysis volatiles from ten kinds of typical types of biomass were analytically identified. The previous detailed modeling was also extended by adding some fundamental reaction equations relating these important tar components. The applicability of the extended modeling was consequently confirmed by comparison of the gas composition analytically identified with that of simulation using the extended modeling. As a result a gas composition and gas volume after gasification could be estimated for any biomass by making a small scale pyrolysis experiment, so that an optimal condition for gasification could be found for any kind of biomass or any purpose to utilize the product gas.

三井造船は、バイオマス由来熱分解揮発成分の気相反応に素反応速度モデルを用いた解析技術を適用し、ガス化炉出口ガス組成推算技術の確立を目指している。前報では、解析のインプットとなるバイオマス由来熱分解揮発成分に含まれるタール成分(化学種)の同定結果について報告した。本報では、代表的なバイオマス10種類の熱分解揮発成分(タール成分)を同定し、その中から既存反応速度モデルに含まれていない重要成分の素反応式を追加した。そして、拡充された素反応速度モデルの妥当性を、シミュレーション結果と実験によるガス組成分析結果との比較から確認した。これにより、種々のバイオマス原料に対して、極少量の熱分解実験を行うことにより、ガス化後のガス組成及びガス量を推算でき、バイオマス種や生成ガスの利用目的に応じたガス化条件を求めることが可能となった。

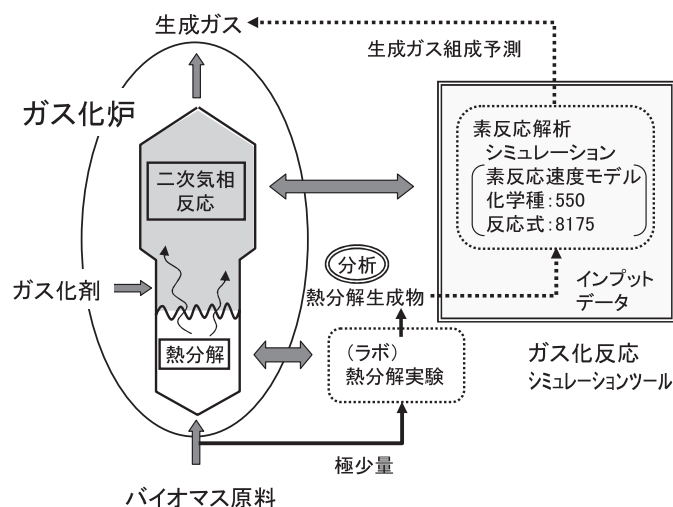


図1 バイオマス由来熱分解揮発成分のガス化反応シミュレーションツール
A Gasification Simulation Tool for Biomass Pyrolysis Volatiles

* 技術開発本部 千葉技術開発センター

*** 九州大学 先端物質化学研究所

** 技術開発本部

1. はじめに

再生可能エネルギーの一つであるバイオマスを、気体燃料や化学原料へ転換する技術は、化石資源使用削減による地球温暖化防止技術の一つとして注目されている。この中で、熱分解ガス化技術は多様なバイオマスを原料にできる特長を有しているが、ガス化された成分を推算する技術は完成されていない。

本研究開発では、この熱分解ガス化技術を用いて様々なバイオマスを利用しやすい燃料形態に転換させることを想定し、熱分解揮発成分からの生成ガス組成推算技術を確立することを目的とした。

前報¹⁾では、素反応解析シミュレーションのためのインプットとなるバイオマス由来熱分解揮発成分を明らかにするために、草本系バイオマスであるパームヤシ空果房(Empty Fruit Bunch: EFB)の急速熱分解生成物の物質収支と熱分解揮発成分中のガス組成を明らかにし、さらに熱分解揮発成分に含まれるタール成分について、ガスクロマトグラフ質量分析(Gas Chromatography-Mass Spectrometry: GC-MS)による化学種の同定と定量結果を報告した。特にタール成分分析では、GC-MSのクロマトグラムに顕著なピークが120を超えて存在し、これらを同定・定量することで捕集したタールの約85 wt%にあたる化学種の定量を実現するとともに、フェノールが際立って多く存在することを明らかにした。

本報では、代表的な木質系・草本系・農業残渣系バイオマスの熱分解揮発成分に含まれる化学種をGC-MS分析により同定し、これら化学種の気相反応過程を取り扱うことができる素反応速度モデルを構築したことと、構築した素反応速度モデルによる生成ガス組成推算結果の妥当性及びシミュレーション適用例について報告する。

2. 様々なバイオマスを扱える素反応速度モデル

2.1 バイオマス10種類の主要タール成分の同定

上述の素反応速度モデルが、木質系・草本系・農業残渣などの様々なバイオマスに適用できるためには、これらバイオマスの熱分解揮発成分に含まれる主要化学種に関する素反応式が、素反応速度モデルの中に含まれていることが必要となる。はじめに、バイオマス種による熱分解揮発成分に含まれる化学種の違い、特にタール成分に含まれる主要な化学種の違いを明らかにするため、サトウキビの絞りかすであるバガスの急速熱分解実験を行った。実験方法は前報¹⁾で示した方法と同様であり、採取した熱分解タールのGC-MS分析を行った。バガス由来熱分解タールのGC-MS分析クロマトグラムを、前報¹⁾で示したEFB由来熱分解タールと合わせて図2に示す。両者のクロマトグラムには大きな違いが存在することが分かる。また、定量分析の結果、EFB由来熱分解タール中最も含有量が多かった化学種がフェノールであったのに対して、バガス由来熱分解タールではジヒドロベンゾフランであった。このように、バイオマス種によって、熱分解タール中の含有量が多い主要化学種は異なることが明らかになった。

そこで、バイオマス種による熱分解物質の特徴を把握するため、木質系バイオマス(トドマツ, カラマツ), 草本系バイオマス及び農業系残渣(EFB, バガス, 綿, 麻, 竹, サトウキビ梢頭部, コーンストーバ, もみ殻)の10種類のバイオマスを選定して、これらの熱分解タールに含まれる主要化学種の同定と定量を行った。表1に10種類のバイオマス由来熱分解タール中の含有量が多い化学種を五つ示す。表1より、含有量が1位または2位の化学種は、フェノール, ジヒドロベンゾフラン, トルエン, レボグルコサンにほぼ集約されることがわかる。このことから、様々なバイオマスを網羅的に取り扱うことができる素反応速度モデルは、これら4種類の化学種に関する素反応式を含んでいる必要がある。

2.2 素反応速度モデルの拡充

共著者である則永は、Richterらが提案した炭化水素の燃焼反応機構²⁾と、Deanらが提案した炭化水素の熱分解反応機構³⁾をベースに素反応速度モデルを構築した⁴⁾。この文献では、Greenらが開発した自動反応機構生成ソフトRMG⁵⁾などを用いて、いくつかの反応式が追加され、セルロースや杉, コーヒーかすの熱分解揮発成分の二次気相反応への適用例が示されている。この素反応速度モデルには、前項で挙げたフェノール, トルエン, レボグルコサンに関する素反応式は含まれている。しかし、ジヒドロベンゾフランに関する素反応式は含まれていないため、ジヒドロベンゾフランに関する素反応式の組み込みを行った。表2に組み込んだジヒドロベンゾフランに関する素反応式の一部を示す。これらの素反応式はLifshitzらの文献⁶⁾から引用した。

素反応の反応速度定数 k は修正アレニウス式を用いると

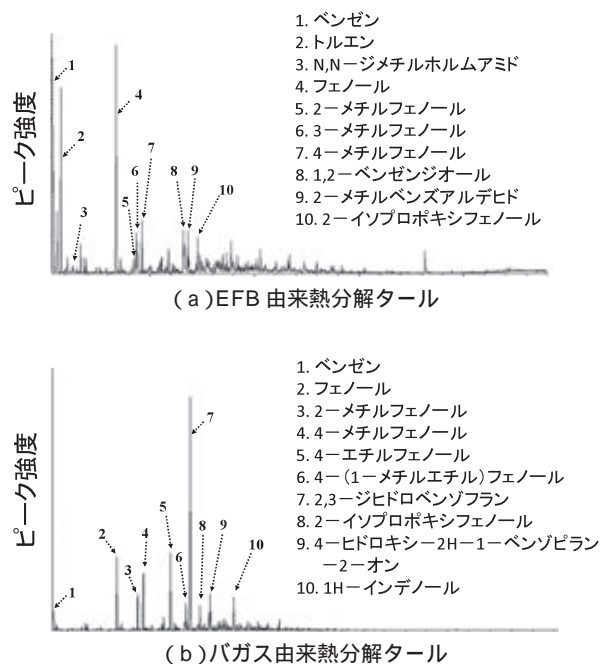


図2 バイオマス由来熱分解タールのGC-MSクロマトグラムの比較
Comparison of Total Ion Chromatograms of Biomass Pyrolysis Tar

表1 木質系・草本系・農業残渣系バイオマスの主要熱分解タール成分の同定
Identification of Main Tar Chemical Species obtained from Pyrolysis of Wood, Grass, and Agricultural Residue

| | EFB | バガス | トドマツ | カラマツ | サトウキビ 柄頭部 | コーン ストーバ | 綿 | 麻 | 竹 | もみ殻 |
|----|------------|----------------|-------------------|---------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------------|-------------------|----------------|
| 1位 | フェノール | 2,3-ジヒドロベンゾフラン | トルエン | レボグルコサン | トルエン | 2,3-ジヒドロベンゾフラン | トルエン | レボグルコサン | 2,3-ジヒドロベンゾフラン | 1-ヘキサデセン |
| 2位 | トルエン | 4-エチルフェノール | レボグルコサン | トルエン | 2,3-ジヒドロベンゾフラン | トルエン | 4-メチル-3-ペンテン-2-オン | トルエン | トルエン | トルエン |
| 3位 | ベンゼン | 1-Hインデノール | ベンゼン | ノナン酸 | 4-メチル-3-ペンテン-2-オン | 2-メトキシ-4-ビニルフェノール | レボグルコサン | 1,6-アンヒドロ-α-D-ガラクトフラノース | レボグルコサン | 2,3-ジヒドロベンゾフラン |
| 4位 | カテコール | フェノール | 4-メチル-3-ペンテン-2-オン | アキノン | フルフラール | フルフラール | ベンゼン | 1,6-アンヒドロ-α-D-ガラクトフラノース | フルフラール | フルフラール |
| 5位 | 4-メチルフェノール | 4-メチルフェノール | フルフラール | バニリン | 2-メトキシ-4-ビニルフェノール | 1-メチル-2-エチルアジジン | 2-メチルペンタナル | フルフラール | 2-メトキシ-4-ビニルフェノール | 2-メチルペンテン-1-オン |

式(1)のように表される。

$$k = AT^n \exp(-E/(RT)) \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 T は絶対温度(K)、 R は気体定数(kJ/mol・K)であり、 A 、 n 、 E は表2に示した頻度因子、指数(-)及び活性化エネルギー(kJ/mol)である。頻度因子の単位は、一次反応の場合(1/s・Kⁿ)、二次反応の場合(cm³/mol・s・Kⁿ)となる。

以上の素反応速度モデルを使用して試験的に酸化反応シミュレーションを行った。このとき、ベンゾフランについてはその気相での分解挙動をフランの類似反応として扱い、ヒドロスチレンについてはフェノール及びスチレンに類似の反応として扱って、類似構造をもつ化学種の反応速度パラメータを代用し、酸化反応での減量曲線が妥当であることを確認した。この結果、10種類の代表的なバイオマスの熱分解揮発成分に含まれる主要な化学種の素反応式を含んだ素反応速度モデルを構築することができた。

3. バイオマス熱分解揮発成分の二次気相反応への素反応シミュレーションの適用

3.1 熱分解揮発成分の二次気相反応実験装置

前節で構築した素反応速度モデルを用いた反応シミュレーション結果の妥当性を検証するため、図3に示す熱分解揮発成分の二次気相反応実験装置を用いて、バイオマス熱分解揮発成分の部分酸化反応の実験を行った。この実験装置の反応管は二重管構造とし、内管下流の管径が細くなる部分には、内管内の固形物の落下を防止するための石英ウールが詰め込まれた。また、反応外管の出口には、前報¹⁾と同様に、冷却された二連の空インピンジャーを接続し、インピンジャーの後段に水分吸水管、湿式ガスメーターを接続した。なお、管

表2 ジヒドロベンゾフランに関する素反応式
Detailed Chemical Kinetic modeling for 2,3-Dihydro-Benzofuran

| 素反応式 | 頻度因子 A | 指数 n | 活性化エネルギー E |
|---|-------------------------|---------|------------|
| CH ₃ + DHBF = DHBFJ + CH ₄ | 2.00 × 10 ¹³ | 0 | 62.802 |
| DHBF = C ₆ H ₅ + CH ₃ CO | 8.00 × 10 ¹⁵ | 0 | 364.252 |
| DHBF = C ₇ H ₇ + HCO | 8.00 × 10 ¹⁵ | 0 | 328.664 |
| DHBF = C ₇ H ₈ + CO | 2.71 × 10 ¹⁵ | 0 | 340.387 |
| DHBF = C ₈ H ₇ OH | 2.04 × 10 ¹⁵ | 0 | 297.681 |
| DHBF = CH ₂ CO + C ₆ H ₆ | 2.40 × 10 ¹⁵ | 0 | 317.359 |
| DHBF = DHBFJ + H | 6.00 × 10 ¹⁵ | 0 | 347.504 |
| DHBF = H ₂ + BF | 7.50 × 10 ¹² | 0 | 255.395 |
| H + DHBF = DHBFJ + H ₂ | 3.00 × 10 ¹⁴ | 0 | 33.494 |
| BF = C ₇ H ₇ + CO | 1.78 × 10 ¹⁵ | 0 | 313.800 |
| DHBFJ = H + BF | 1.00 × 10 ¹³ | 0 | 180.032 |
| DHBFJ + O ₂ = HO ₂ + BF | 3.62 × 10 ¹¹ | 0 | 0.000 |
| DHBFJ + OH = H ₂ O + BF | 1.14 × 10 ¹³ | - 0.071 | - 0.009 |
| DHBFJ + HO ₂ = H ₂ O ₂ + BF | 1.14 × 10 ¹³ | - 0.071 | - 0.009 |
| OH + C ₆ H ₆ = H + C ₆ H ₇ OH | 1.56 × 10 ²⁴ | - 3.2 | 70.757 |
| C ₆ H ₇ OH = a ₁ C ₂ H ₃ * + OH | 5.00 × 10 ¹⁶ | 0 | 481.482 |
| C ₆ H ₇ OH + C ₂ H ₄ = C ₈ H ₇ OH | 1.50 × 10 ²² | - 2.6 | 26.293 |
| C ₆ H ₇ OH = C ₃ H ₂ + C ₆ H ₅ OH | 1.58 × 10 ¹¹ | 0 | 244.677 |
| C ₆ H ₇ OH + C ₂ H ₄ = H + C ₈ H ₇ OH | 2.51 × 10 ¹² | 0 | 25.958 |
| C ₂ H ₃ + C ₆ H ₅ OH = H + C ₈ H ₇ OH | 7.94 × 10 ¹¹ | 0 | 26.769 |

DHBF : ジヒドロベンゾフラン
BF : ベンゾフラン
DHBFJ : C₈H₇O (ラジカル)
a₁C₂H₃* : C₈H₇ (ラジカル)

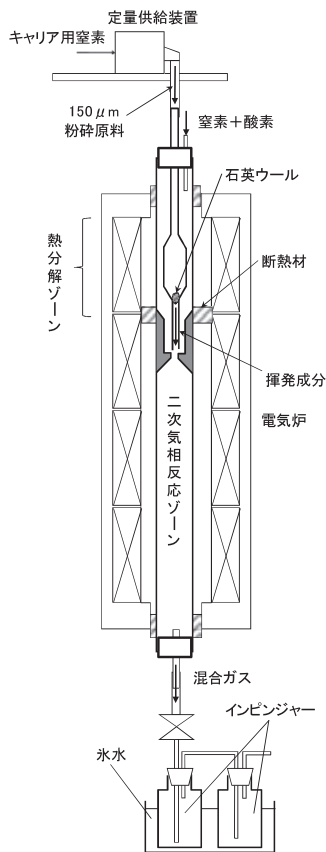


図3 熱分解揮発成分の二次気相反応実験装置
Laboratory Scale Experimental Apparatus
for Gas Phase Reaction of Pyrolysis Volatiles

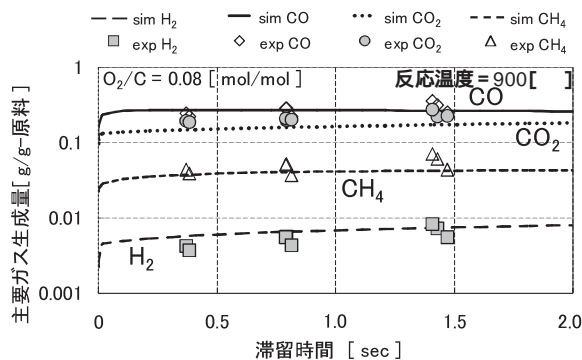


図4 実験値と解析値の比較(主要ガス組成と滞留時間の相関)
Comparison between Experimental and Calculated Values
(Relation between Main Gas Composition and Residence Time)

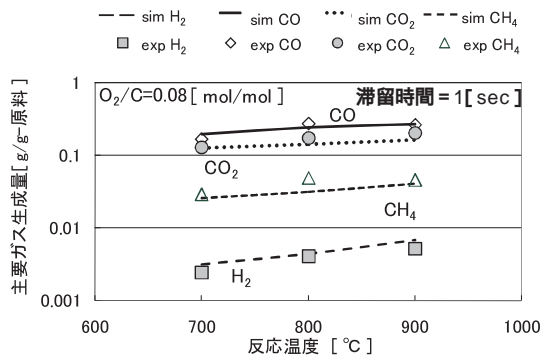


図5 実験値と解析値の比較(主要ガス組成と反応温度の相関)
Comparison between Experimental and Calculated Values
(Relation between Main Gas Composition and Reaction Temperature)

径の異なる3種の反応外管を用意し、二次気相反応の滞留時間を変えた実験を可能とした。

3.2 熱分解揮発成分の二次気相反応実験方法

3.1で示した石英製の反応内管・外管を電気炉にセットし、電気ヒーターによって熱分解ゾーンと二次気相反応ゾーンをそれぞれの所定の温度に加熱する。ホールピペット形状の反応内管の内部にはキャリア用窒素を流通させ、二重管構造の両管の間隙には二次気相反応のための酸化反応剤(ここでは酸素)と、滞留時間調整用の窒素を混合して流通させる。各部の温度が一定になったところで、定量供給装置を稼働させる。150 μm以下に粉碎されたバイオマスはキャリア用窒素とともに定量的に供給され、熱分解ゾーンで急速に熱分解される。熱分解によって発生した炭化物は石英ウールに残り、揮発成分は石英ウールを通過し内管先端から出て外管の絞り部で酸化反応剤と混合された後、二次気相反応ゾーンに流入し、二次気相反応を起こす。その後、外管を出た混合ガスは、凝縮成分がインピンジャー内で捕捉された後、テドラバックにて捕集され、それぞれ適切な方法で分析される。

3.3 素反応シミュレーションの概要

素反応シミュレーションは、CHEMKINに代表される汎用の化学反応シミュレーションソフトウェア⁷⁾を用いて行なわれる。このソフトウェアに、2.2で拡充した素反応速度モ

デルと化学種の熱力学データ、インプットデータ(熱分解揮発成分と酸化反応剤の種類と量)を入力し、解析条件(反応温度、圧力、滞留時間など)を設定して数値計算を行ない、経過時間毎の反応生成物量を求める。

3.4 実験値とシミュレーション結果との比較

バガスの熱分解揮発成分に酸素を吹き込み、部分酸化させる二次気相反応実験を行い、主要ガス成分である水素(H₂)、一酸化炭素(CO)、二酸化炭素(CO₂)、メタン(CH₄)の生成量の実験値を取得した。熱分解ゾーンの温度は650で一定とし、滞留時間、二次気相反応ゾーンの温度、酸素/炭素モル比(O₂/C)をパラメータとした。これらのパラメータ条件を合わせて、バガスの熱分解揮発成分をインプットデータとした反応シミュレーションを、前章で構築した素反応速度モデルを用いて行った。図4に、滞留時間に対する主要ガス成分の生成量について、実験値とシミュレーション結果の比較を示す。なお、O₂/Cは0.08で、二次気相反応温度は900である。滞留時間が増加するほど、実験値の各成分とも微増の傾向を示している。また、シミュレーション結果も同様の傾向を示し、実験点と良く一致している。

次に、図5に二次気相反応温度に対する主要ガス成分の生

成量変化を示す．ここでは、 O_2/C が0.08で、滞留時間1secである．二次気相反応温度が700、800、900の3ケースの実験結果は、温度が高くなるほど各ガス成分の生成量が増加する傾向を示し、シミュレーション結果もこの傾向を良く表している．さらに、図6に二次気相反応の O_2/C に対する主要ガス成分の生成量変化を示す． O_2/C を0.08から0.18へ増加させた場合、各ガス成分の生成量の実験値は増加傾向を示した．シミュレーション結果も、 CH_4 以外の3成分については実験値と良く一致している．

図4～6に示したように、バガスの熱分解揮発成分の二次気相反応における主要ガス成分の生成量について、実験で得られた熱分解揮発成分の組成をインプットデータとしたシミュレーション結果は、滞留時間、二次気相反応温度、 O_2/C のいずれのパラメータに対しても、実験値と良く一致した．これらの比較から、構築した素反応速度モデルの妥当性が示された．

4. 素反応速度モデルを用いたケーススタディー

4.1 迅速熱分解分析装置によるインプットデータの取得

前節で示された通り、構築した素反応速度モデルを用いたシミュレーションにより、バイオマスの熱分解揮発成分の二次気相反応後のガス組成を十分予測できることが分かった．ただし、このシミュレーションを行うためには、インプットデータとなる原料バイオマスの熱分解揮発成分の組成を得る必要がある．そこで、極少量のバイオマス試料を使用して、より簡便で迅速に熱分解揮発成分を分析できる装置を製作した．製作した装置の概略図を図7に示す．バイオマスを急速熱分解する装置と、熱分解によって発生する揮発成分の分析装置が6方バルブを介して直接接合された構成となっている．急速熱分解装置は電気炉に石英製のU字型反応管を挿入し、U字管の途中には、熱分解固形物がキャリアガスに同伴することを防止する目的で、石英ウールを詰めている．

実験に際しては、キャリア用ガスを流通させながら反応管を所定の温度に昇温し、約1mgのバイオマス試料を反応管内に落下させて熱分解させる．熱分解揮発成分は、6方バルブ

ブを経て、ガス分析装置へ導入され、ガス成分及びタール成分の分析を行う．このように少量のバイオマス原料を使って、短時間で容易に試料点数を増やせるため、再現性を確認した信頼できるデータが取得できる．

4.2 混合原料の気相反応ケーススタディー

3.4では、1種類のバイオマスについて、熱分解揮発成分を実験的に求めてインプットデータが得られれば、素反応速度モデルを使用した反応シミュレーションにより、二次気相反応後のガス組成を精度良く推算できることを、実験結果との比較から示した．さらに、2種類のバイオマスそれぞれの熱分解揮発成分を実験的に求め、この熱分解揮発成分を算術平均した値と、2種類のバイオマスを予め混合して熱分解揮発成分を実験的に求めた値が一致することを確認した．したがって、バイオマスの混合比率に合わせて熱分解揮発成分を算術平均してインプットデータを作成することで、混合バイオマスについても二次気相反応後のガス組成の推算が可能となる．

一例として、2種類のバイオマスを混合して流動床ベッド部で熱分解し、フリーボード部で酸素と水蒸気で二次気相反応させる場合を想定し、バイオマスの混合割合がフリーボード出口のガス組成に与える影響を、構築した素反応速度モデルを用いてシミュレートした．まず、前節で示した迅速熱分解分析装置を使用して、草本系バイオマスAと農業残渣系バイオマスBの650における熱分解揮発成分分析を行い、それぞれの揮発成分組成を実測した．次にシミュレーションのためのインプットデータとして、バイオマスAとBの混合割合に応じた熱分解揮発成分組成を算術平均で設定した．フリーボード部の反応温度を1000一定とし、 O_2/C が一定となるようにバイオマスの混合割合に応じて酸素量を設定した．なお、酸素/水蒸気の量比は一定とした．図8

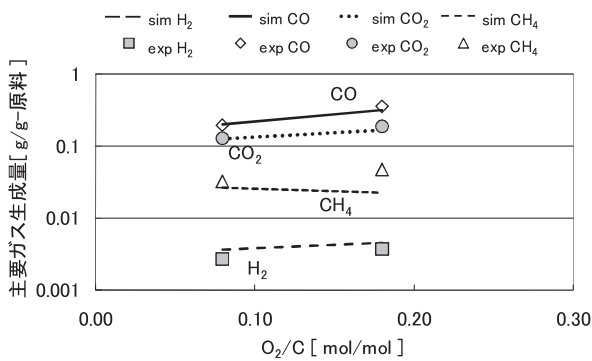


図6 実験値と解析値の比較(主要ガス組成と酸素比の相関)
Comparison between Experimental and Calculated Values
(Relation between Main Gas Composition and O_2/C)

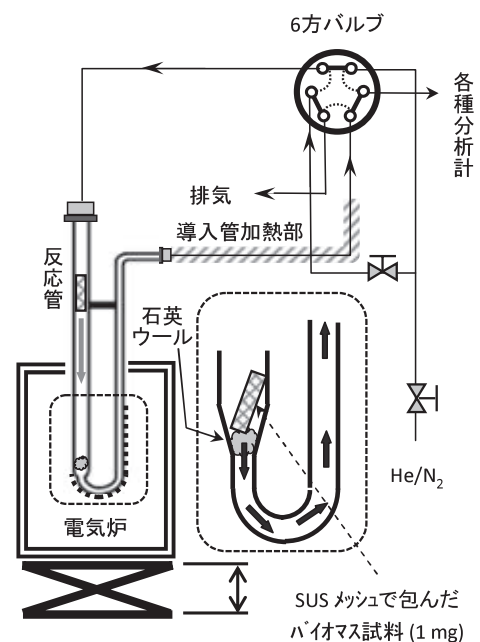


図7 迅速熱分解分析装置
Rapid Pyrolysis Experimental and Analyzing Apparatus

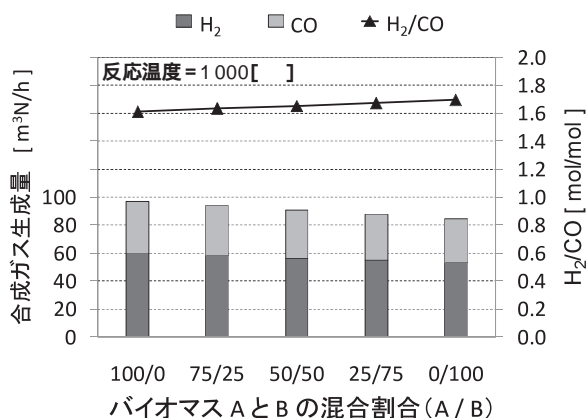


図8 バイオマス混合原料からの合成ガス予測
Simulation Results of Synthesis Gas Yield
from Mixed Biomass Raw Material

に、バイオマス混合割合に対する、シミュレーションで得られた合成ガス生成量と合成ガス中の水素 / 一酸化炭素モル比 (H₂/CO)の結果を示す。バイオマス A100%の方がバイオマス B100%よりも合成ガス量は多く、バイオマス Bの混合割合が増加するほど合成ガス量は単調に減少する一方、H₂/COは増加する傾向を示した。このように、任意の混合割合のバイオマスに対して、生成ガス量やガス組成を予測することが可能となった。

5. まとめ

代表的なバイオマス原料に対し、簡単な熱分解実験による主要化学種の分析値に基づいて、熱分解揮発成分の二次気相反応における生成ガス組成の推算が可能な素反応速度モデルの構築を目指し、以下の成果を得た。

- (1)バガスの熱分解実験を行い、揮発成分に含まれる熱分解タールの化学種をGC-MSによって分析し、含有量の大きい主要化学種を同定した。その分析結果と、前報¹⁾のEFBの熱分解の場合との比較から、バイオマス種によって熱分解タールに含まれる主要化学種が異なることが分かった。
- (2)代表的な木質系・草本系・農業残渣系バイオマス10種類について、熱分解実験による生成タール分析を行って主要化学種を同定した。その結果、特に含有量の多い化学種は、フェノール、トルエン、ジヒドロベンゾフラン、レボグルコサンであった。この4種類の化学種の中で、則永が構築した素反応速度モデル⁴⁾に含まれていないジヒドロベンゾフランに関する素反応式を追加することで、様々なバイオマスを取り扱うことができる素反応速度モデルを構築した。
- (3)構築した素反応モデルを使用して、バガスの熱分解揮発成分に対して、滞留時間、反応温度、酸素 / 炭素モル比をパラメータとした二次気相反応シミュレーションを行

い、同条件の実験値と比較した。その結果、両者は良く一致したことから、構築した素反応速度モデルの妥当性を確認できた。

- (4)さらに、極少量のバイオマス試料から、簡便でかつ迅速に熱分解揮発成分を分析できる装置を製作し、シミュレーションのインプットデータとなる熱分解揮発成分組成を求められるようになった。得られた組成結果から、任意の混合割合のバイオマスに対して、生成ガス量やガス組成を予測することが可能となった。

今後は、構築した素反応速度モデルを使用した反応シミュレーションツールを所定の生成ガス組成を得るのに適する原料のスクリーニングや、最適運転のための指標作りに活用する予定である。

参 考 文 献

- 1)宮地・外：草本系バイオマス由来熱分解タール含有化学種の特定，三井造船技報，199(2010-2)，p. 47
- 2)Richter, et al. : PCCP, (2002-4) p. 2038
- 3)Sheng, et al. : J. Phys. Chem. A, (2004-108) p. 3772
- 4)則永・外：木質バイオマス迅速熱分解生成物の in-situ 気相部分酸化反応機構，第17回日本エネルギー学会大会要旨集，(2008)，p. 98
- 5)Green, et al. : J. Phys. Chem. A, (1997-101) p. 3731
- 6) Lifshitz, et al. : Proceedings of the Combustion Institute, (2000-28), p. 1733
- 7)菱化システム：CHEMKIN, http://www.rsi.co.jp/kagaku/cs/reaction_design/index.html, (2012-5-18)

〔問い合わせ先〕

技術開発本部 千葉技術開発センター
TEL 0436 - 41 - 1102 宮地 健



宮地 健



片桐 学



藤田 理人



神田 伸靖



則永 行庸

犠牲陽極を使用した鋼材の大気防食技術の開発

石原修二* 内田大介** 浅野浩一***
 西山研一**** 高川真仁***

Development of Anticorrosion Engineering of Steel Products using a Sacrificial Anode under the Atmosphere

Shuji ISHIHARA, Daisuke UCHIDA, Koichi ASANO, Ken-ichi NISHIYAMA, Shinji TAKAGAWA

For anticorrosion engineering of steel products in the atmosphere environment, painting is generally adopted. However, when the repainting is required due to defects and/or time degradation of coating film, it is not rare that the durability of repainted coating film deteriorates remarkably by corrosion products or chlorides which are left over from the surface preparation.

Therefore, we developed an anticorrosion technique which is a combined sacrificial anode formed of porous material of Al and Zn with cross linking fiber with water holding property. This technique has unprecedented advantages. Corrosion protection can be achieved with the sacrificial anode not only in the rain and the corrosion protection is secured steadily by absorbing an unevenness resulting from the insufficient surface preparation by means of the flexibility of fiber. We find out in this technology a possibility of establishing effective and economic corrosion protection technique that overcomes the problem of the conventional painting.

大気環境における鋼部材の防食方法としては、塗装が一般的に採用されている。しかし、塗膜の欠陥や経時劣化によって再塗装が必要となった際、素地調整時に残留するおそれのある腐食生成物や塩化物などの状態によっては、再塗装後の塗膜耐久性が著しく影響を受ける。

この課題解決に向け、Al-Znの多孔質体からなる犠牲陽極及び保水性の架橋型繊維の組み合わせによって形成される防食技術を開発した。本技術は、降雨時以外においても犠牲陽極による腐食抑制作用を常に発現できることや、下位グレードの下地処理でも、繊維の柔軟性によって表面の凹凸を吸収することで防食効果を一様に確保できることなど、これまでにない特長を有している。従来の塗装の課題を克服した効率的かつ経済的な防食技術としての可能性を見いだした。



図1 防食メカニズムの概念
 Conceptual Model of Mechanism of Corrosion Protection

* 技術開発本部 基盤技術センター
 ** 船舶・艦艇事業本部 基本設計部

*** 三井造船鉄構エンジニアリング株式会社
 **** 船舶・艦艇事業本部 企画管理部

1. はじめに

1960年代の高度経済成長期に建設された橋梁やプラントなどの施設は、供用開始後50年を超えるものが増加しつつあり、老朽化の問題がますます深刻化するものと予想される。鋼構造物では、主に疲労や腐食に起因して損傷が生じる。特に橋梁の場合、飛来塩分の多い沿岸地域だけでなく、山間部でも凍結防止剤の散布によって、桁端部を中心に腐食による損傷が発生している。しかし、限られた予算の中で多数の橋梁を維持管理するためには延命化がポイントとなり、特に腐食損傷への対応は、今後ますます重要となる。

一般的な鋼構造物の防食処理は塗装によって行われている。塗装は鋼材表面に施工された塗膜により、鋼材表面を腐食環境から遮断することで、腐食の進行を抑制するものである。しかし、塗膜の欠陥や経時劣化に伴う水分や腐食成分の侵入は避けられず、長期的に信頼される確実な方法ではない。そのため、防食効果を維持させるためには、定期的な再塗装が必要になる。しかし、素地調整時に腐食生成物や腐食促進作用を持つ塩化物等を完全に除去することは困難であるため、再塗装後の塗膜耐久性が著しく低下し、目標とした防食効果が得られないことが少なくない。そこで、これら塗装の欠点を克服し、塗装では対応困難な厳しい腐食環境へ適用でき、下地処理の状態に依存せずに良好な防食効果が得られる新しい防食技術の開発を試みた。

2. 犠牲陽極防食技術の基本構成

本防食技術は、犠牲陽極としてのAl-Zn多孔質焼結板(以下、多孔質板)と架橋型繊維シート(以下、繊維シート)による構成を特徴としている。この二つの材料を図2に示すように配置し、被防食材と電氣的に接続することによって犠牲陽極による防食効果が発現する。

犠牲陽極材を多孔質とすることにより、犠牲陽極の機能に加えて、雨水や結露による水分を効率的に吸水させる機能もあわせて持たせることができる。一方、繊維シートは、多孔質板から吸水された水分を長期間継続的に保水でき、犠牲陽極反応を継続的に作用させる機能を有している。また、構造物製作時の溶接変形や腐食表面の凹凸等に対して繊維の柔軟

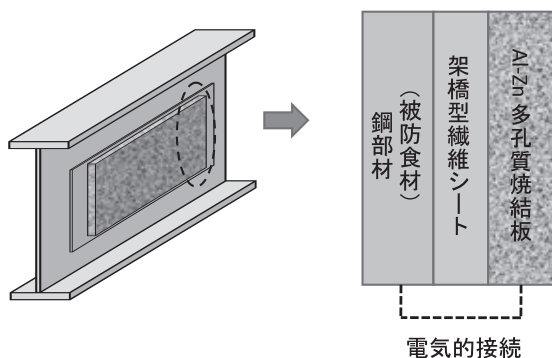


図2 防食技術の基本構成
Basic Constitution of Anticorrosion Technology

性を生かすことによって、良好な密着性を維持できることになり、防食効果を確実に作用させることが可能となる。

3. 構成材料の最適化

3.1 犠牲陽極材

3.1.1 多孔質板の製作

犠牲陽極材の多孔質化の利点には、内部への水分供給以外にも、電極としての活性点の増加や犠牲陽極材自体の軽量化が挙げられる。多孔質板は、Al及びZnの金属粉末の比率を変えて混合したものと、アトマイズ法によりAl-Zn合金粉末としたものを原料とし、放電プラズマ焼結法により、66×66mm、厚さ5mmの寸法で製作した¹⁾。多孔質板の気孔率は金属粉末の粒径によって制御できる。水分の供給及び多孔質板自体の強度確保のバランスを考慮し、今回はいずれも気孔率30%となるよう粒度調整を行った。表1に試験に使用した多孔質板の一覧を示す。この供試材を用いて、多孔質板の最適化のための評価を実施した。

3.1.2 多孔質板の電気化学特性

多孔質板の電気化学特性を評価するため、アノード分極曲線の測定及び定電流保持による劣化試験を室温大気雰囲気下で行った。

アノード分極曲線の測定では、大気腐食環境で構造物に付着する飛来海塩、橋梁路面に散布される凍結防止剤の濃縮性を考慮し、電解液として0.1wt%及び20%の飽和濃度26.4wt%のNaCl水溶液で挙動を比較した。対極に白金、参照電極に銀-塩化銀電極を使用し、走査速度20mV/minで計測を行った。

アノード分極曲線の測定結果を図3に示す。NaCl濃度にかかわらず、原料に混合粉と合金粉を用いた各多孔質板で異なる挙動を示している。混合粉多孔質板ではいずれも分極曲線が2段階の形状を示しており、AlとZnはそれぞれ単独に反応していると推定される。自然電位の関係から、1段階目はZn、2段階目はAlが主体の反応を示していると考えられる。

次に、定電流保持による多孔質板の強制劣化試験を行った。図3のアノード分極曲線より、混合粉多孔質板において、実環境で主に防食に寄与していると考えられるZnの挙動を基に、26.4wt%NaCl水溶液中、100 μ A/cm²に各多孔質板を定電流保持することとした。そのときの電位の経時変化を比較するとともに、試験後の多孔質板の状態を電子線マイクロアナライザ(Electron Probe Micro Analyzer : EPMA)により分析し、各組成における劣化の進行状況の相違を評価した。

図4に定電流保持した多孔質板の電位の経時性を示す。多孔質板の種類によらず、劣化に伴って電位は増加する傾向に

表1 供試材の一覧
List of Test Specimen

| 供試材 | 原料粉 | 組成 (mass%) | | 気孔率 (%) |
|--------|-----|------------|----|---------|
| | | Al | Zn | |
| 多孔質板 A | 混合粉 | 50 | 50 | 30 |
| 多孔質板 B | | 80 | 20 | |
| 多孔質板 C | 合金粉 | | | |

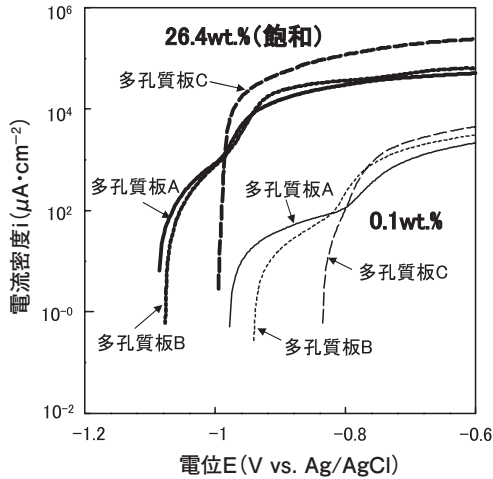


図3 多孔質板のアノード分極曲線
Anodic Polarization Curve of Porous Sintered Plate

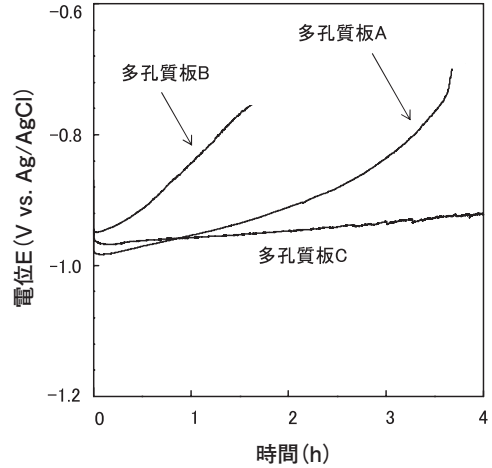


図4 定電流保持時の多孔質板の電位変化
Potential Change of Porous Sintered Plate at Constant Current Maintenance

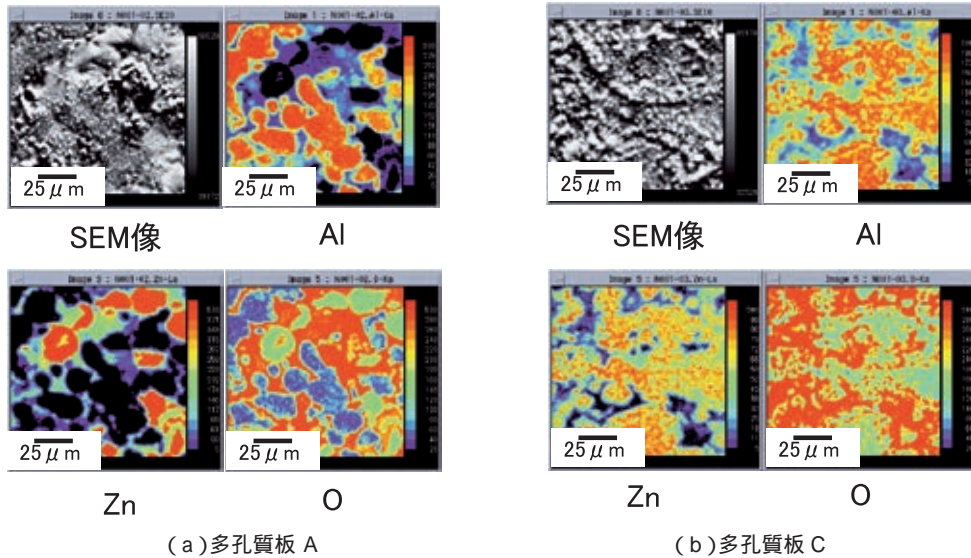


写真1 劣化試験後の多孔質板の元素分布
Element Distribution of Porous Sintered Plate after the Degradation Test

あるが、電位の増加率は、多孔質板 B, 多孔質板 A, 多孔質板 C の順に小さくなっていった。また、試験後の多孔質板 A 及び C の断面の EPMA 分析結果を写真 1 に示す。混合粉の試料(多孔質板 A)では、特に Zn が偏析しているところで、Al に比して Zn が優先的に酸化する傾向にあった。

以上の結果から、混合粉を原料とした多孔質板の犠牲陽極作用は、防食性能や寿命面から Zn に依存しているといえる。一方、合金粉を用いた多孔質体は、電極としての活性も高く、劣化に対しても均質な特性を示しており、陽極材として、優れた材料の一つであると考えられる。

3.2 繊維シート

本防食技術では繊維シートを用いることで、雨水、結露水などの水分を多孔質板と鋼板の間に供給・保水し、天候変動によらず犠牲陽極反応を継続させ得る。

繊維シートの基本特性を把握するため、耐乾燥性及び吸水

性を評価した。試験には種類の異なる繊維を含む 2 種のシートを使用した。この繊維の種類と配合を表 2 に示す。なお、繊維シートの目付及び厚さは、それぞれ 300 g/m², 3 mm とした。耐乾燥性はイオン交換水を吸水させた繊維シートを 40 の熱風乾燥状態で保持し、その状態における保水率の経時性にに基づき評価した。このとき保水率(m)は、乾燥させた繊維シートの重量(m_1)及び保水させた繊維シートの重量(m_2)を用いて、以下のとおり定義して算出した。

$$m = m_2/m_1 - 1 \dots\dots\dots(1)$$

また、吸水性はイオン交換水を用いて、パイレック法(JIS L1907)で評価した。

耐乾燥性の評価結果を図 5 に示す。乾燥開始前の保水率は、繊維シート A 及び B で、それぞれ 0.8, 1.3 となっている。また、繊維シート B は A の約 1.6 倍のイオン交換水を保持している。

表2 繊維シートの仕様
Specifications of Fiber Sheet

| | 繊維シートA | 繊維シートB |
|---------|----------------------|--------|
| 機能繊維 | 架橋型繊維 | 多孔質繊維 |
| | 70 wt% | 70 wt% |
| バインダー繊維 | ポリエステル繊維 30 wt% | |
| 目付 | 300 g/m ² | |
| 厚み | 3 mm | |

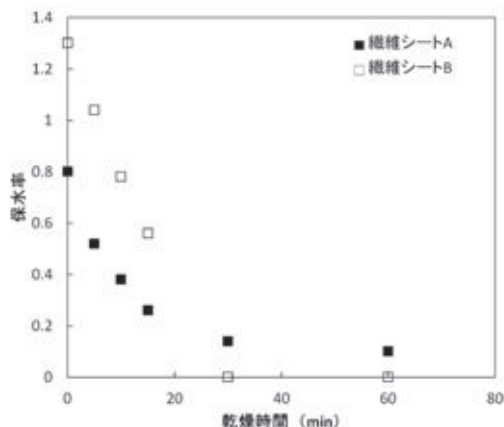


図5 繊維シートの耐乾燥性
Drought Resistance of Fiber Sheet

繊維シート B は 30 分で保水率 0 となっているが、繊維シート A は 30 分以上経過しても保水していた。

吸水性の評価結果を図6に示す。繊維シート B は、吸い上げ長が約 120 mm まで到達しているが、繊維シート A については約 25 mm となっている。なお、繊維シート B の初期の吸い上げ速度は、A に比して速かった。

以上から、耐乾燥性については繊維シート A が、吸水性については繊維シート B が優れていることが分かった。その後の試験より、本防食技術に必要な特性は耐乾燥性であることが確認されたため、以降の評価には、繊維シート A を使用している。

4. 防食効果の検証

4.1 防食有効範囲の検討

本防食技術の構造物への適用性や経済性を検討するためには、適正な防食効果を得るための多孔質板の配置間隔を明らかにすることが重要となる。そこで、犠牲陽極効果が機能している多孔質板の材端からの鋼板の電位分布を計測することによって、犠牲陽極による防食効果の有効範囲を定量的に評価した。

防食有効範囲の計測方法を図7に示す。鋼板、繊維シート、多孔質板の順に重ねて試験体を形成し、鋼板と多孔質板をアルミ箔で接続することによって両電極間に導通を持たせた。多孔質板と繊維シートが電解液を吸水・保水することで、多孔質板と鋼板の間に回路が形成され電位差が生じる。多孔質

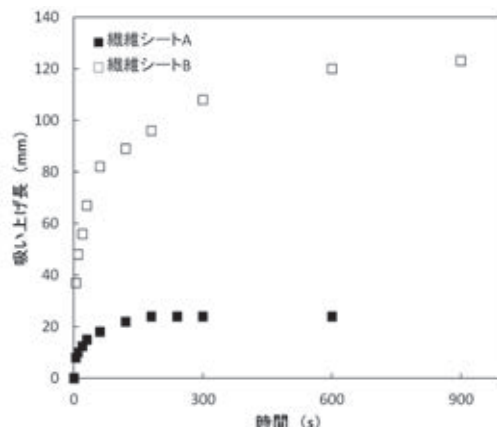


図6 繊維シートの吸水性
Water Absorbency of Fiber Sheet

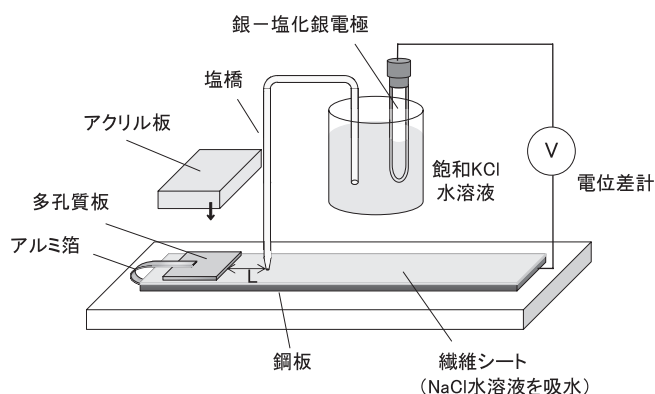


図7 防食有効範囲の計測方法
Measurement Procedure of the Effective Range of Corrosion Protection

板端から任意の距離に設置した塩橋を用いて、鋼板の電位を測定することにより、多孔質板の犠牲陽極作用の有効範囲を検討した。なお、計測のピッチは多孔質板端から 50 mm ごととした。試験開始から連続で電位の変動を監視し、変動がなく安定したときの電位をその計測点での鋼板の電位とした。

0.1 wt% 及び 20 での飽和濃度 26.4 wt% の NaCl 水溶液における各多孔質板の電位分布の計測結果を図8に示す。あわせて多孔質板の影響を受けないときの鋼板の自然電位 (0.1 wt% NaCl : 約 - 0.65 V vs. Ag/AgCl, 26.4 wt% NaCl : 約 - 0.62 V vs. Ag/AgCl) も図8中に記載した。塩橋によって計測した電位が鋼板の自然電位よりも低ければ、その地点の鋼板は犠牲陽極の作用を受けていると考えられる。ただし防食効果が有効かどうかは、中性環境中における鋼材の電気防食の基準とされる一般的な電位 - 0.77 V vs. SCE (- 0.73 V vs. Ag/AgCl) と比較することによって判断した。

NaCl 濃度が 0.1 wt% の場合、多孔質板組成による電位分布の差異はほとんどなく、多孔質板端から 50 mm 以上離れた位置の電位は、鋼板自体の自然電位とほぼ同等となっている。一方、NaCl 濃度が 26.4 wt% の場合は、多孔質板組成

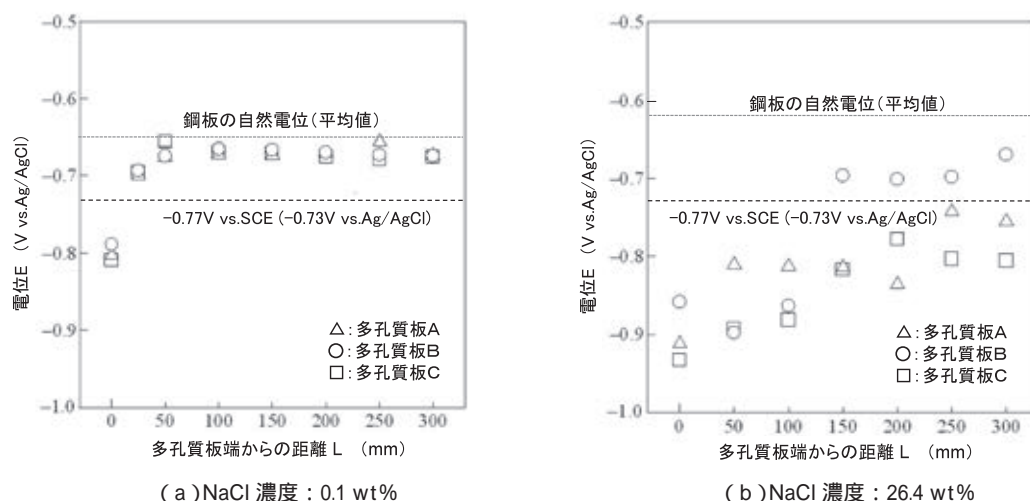


図8 犠牲陽極作用時の鋼板の電位分布
Potential Distribution of Steel Plate at the Time of Sacrificial Anode Action

表3 犠牲陽極作用時の防食有効範囲
Effective Range at the Time of Sacrificial Anode Action

| 試料名 | 防食有効範囲(mm) (NaCl 濃度: 26.4 wt% E < -0.77 V vs.SCE) |
|--------|--|
| 多孔質板 A | 200 |
| 多孔質板 B | 100 |
| 多孔質板 C | 300 以上 |

により電位分布に差異が生じているが、多孔質板端から少なくとも 100 mm 以内の範囲においては、いずれも -0.77 V vs.SCE 未満となっていた。これは NaCl 濃度の増加に伴う電気伝導率の上昇によって溶液抵抗が低下したためと推定される。マクロセル腐食環境では、電気伝導率の上昇は、一般的にアノードの腐食速度の増大因子として捉えられるが、カソード側の視点に立つと、防食効果の拡大と捉えることができる。一方で、多孔質板の組成に着目した場合、NaCl 濃度の上昇とともに、その組成が鋼板の電位分布に及ぼす影響が大きくなっている。図8の NaCl 濃度 26.4 wt% のデータより、-0.77 V vs.SCE (-0.73 V vs. Ag/AgCl) 以下の電位を示している多孔質板端からの距離を表3にまとめた。犠牲陽極の有効範囲は、多孔質板 A の方が多孔質板 B よりも広い。この有効範囲の相違は、多孔質板に含有される Zn 量に依存していると考えられる。つまり、混合粉焼結体の場合、犠牲陽極効果に直接寄与しているのは、主に Zn と推定される。一方で、合金粉焼結体の場合は、高濃度の NaCl 水溶液環境中において、より広範囲に犠牲陽極効果の発現が期待できる。

写真2に多孔質板 C の計測終了後の鋼板の外観を示す。NaCl 濃度 0.1 wt% の場合は、多孔質板端から約 50 mm 以降で腐食が見られたのに対し、NaCl 濃度 26.4 wt% の場合は、多孔質板端から約 300 mm にわたって腐食は確認されなかった。図8の計測結果から得られる防食有効範囲の推定を裏付けるものと考えられる。

4.2 大気暴露試験による実環境での評価

図9の構造を持つ試験体を製作し、琉球大学千原キャンパス構内 (Lat.26°15'N, Long.127°46'E) で6ヶ月の大気暴露試験を実施した。暴露地点の気温、相対湿度、降水量及び飛来塩分量 (JIS Z 2382) の年平均値を表4に、暴露試験の状況を写真3に示す。試験終了後の鋼板表面の防食状況を写真4に示す。中央の黄色枠内は多孔質板 A が貼付されていた位置で、その周囲約 20 mm の範囲にわたって防食されていた。試験体のおかれた腐食環境は、図8の NaCl 濃度 0.1 wt% に近い状態と想定される。図8の NaCl 濃度 0.1 wt% のデータが示すように、多孔質板端から 25 mm の鋼板電位は、鋼板本来の自然電位以下であるため、多孔質板による犠牲陽極の作用を受けていると考えられる。このことから、大気暴露環境下においても、多孔質板及び繊維シートを組み合わせることによって、鋼板表面は実験室での計測結果と同様な電位分布を持ち、電位分布に相当した防食効果の拡大が見込めることが分かった。

一般的な塗膜により防食を行う場合、大気暴露環境下では乾湿によって塩が濃縮するなど、腐食環境が厳しくなるほど防食効果が低下する。凍結防止剤などが散布される橋梁では、特に桁端部で漏水により飽和濃度に相当する高濃度の NaCl や CaCl_2 の水溶液環境に曝される場合も少なくない。このような環境においては、写真2に示されるように、犠牲陽極材の損耗は大きくなるものの、広範囲に防食効果が発現できる可能性がある。多孔質板の配置に制約がある場合など、この特性は大きなメリットとして機能すると考えられる。今後、実際の腐食状況と対比することで、詳細な有効範囲を検証していく予定である。

5. おわりに

犠牲陽極による防食方法は、港湾・海洋施設や船舶などの海水中に曝される鋼部材で既に数多くの実績を挙げている。しかし、大気環境下で確実かつ効率的に犠牲陽極の作用を機



(a) NaCl 濃度 : 0.1 wt%



(b) NaCl 濃度 : 26.4 wt% (20 飽和)

写真2 計測終了後の鋼板の外観
Appearance of Steel Plate after the Measurement

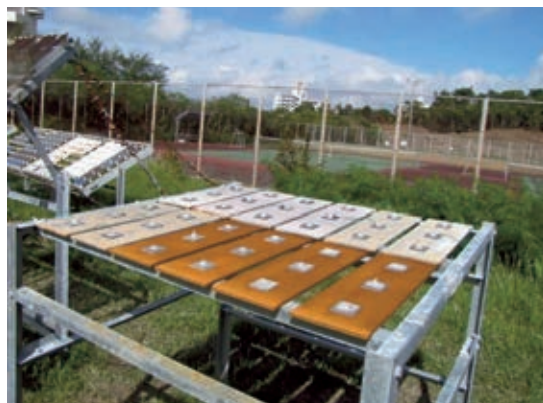


写真3 大気暴露試験の状況
Situation of Exposure Test under the Atmosphere

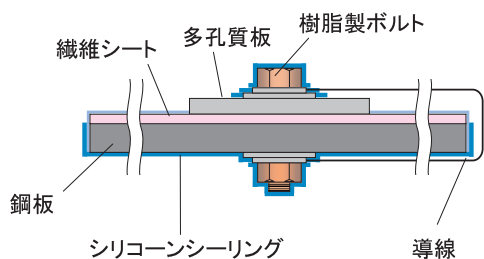


図9 暴露試験体の構造
Structure of Exposure Test Specimen

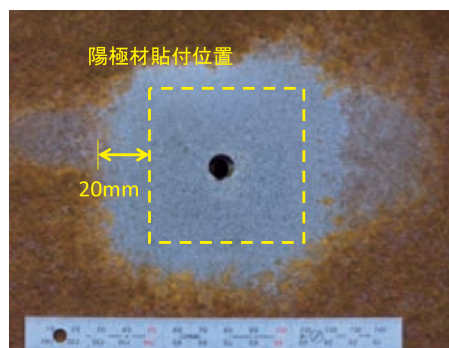


写真4 大気暴露試験後の防食状況
Condition of Corrosion Protection after Exposure Test under the Atmosphere

表4 暴露地点の気象データ(年平均値)
Meteorological Data in Exposure Field(Annual Average Value)

| 気温 () | 相対湿度 (%) | 降水量 (mm) | 飛来塩分量 (mdd) |
|-----------|-------------|-------------|----------------|
| 23.0 | 72 | 1865 | 0.3 |

能させるためには、水分(大気湿気、降雨、漏水)や電解質(飛来海塩、凍結防止剤の塩化物など)を効率的に制御・活用することが不可欠となる。

本研究では、Al-Zn 多孔質焼結体と架橋型繊維を含むシートを組み合わせることによって、大気環境下で効果的に機能する新しい防食技術を見いだすことができた。今後、従来の素地調整に起因する課題を解決し、効率的かつ経済的な防食技術となるよう実用化を進める予定である。

最後に、本研究は、九州大学大学院工学研究院社会基盤部門 貝沼重信准教授、日本軽金属株式会社 兼子彬研究員、日軽金アクト株式会社 豊田英治グループリーダー、玉石雅敬プロジェクトリーダー、東洋紡績株式会社 住谷龍明 AP 事業部長、日本エクスラン工業株式会社 山内孝郎第2製造部技術グループ課長のご協力により実施した。各位に感謝の意を表する。

参考文献

- 1)玉石・外：アルミニウム多孔質体及びその製造方法，

日本国特許庁公開特許公報，特開 2009-270149(2009)
2)蜂谷：防食電位，防食技術，34，(1985)，p. 635

〔問い合わせ先〕

技術開発本部 基盤技術センター
TEL 0863 - 23 - 3103 石原 修二



石原 修二



内田 大介



浅野 浩一



西山 研一



高川 真仁

森永橋歩道橋(鋼上部工)工事 - ニールセンローゼ橋の製作・架設 -



写真1 完成した森永歩道橋

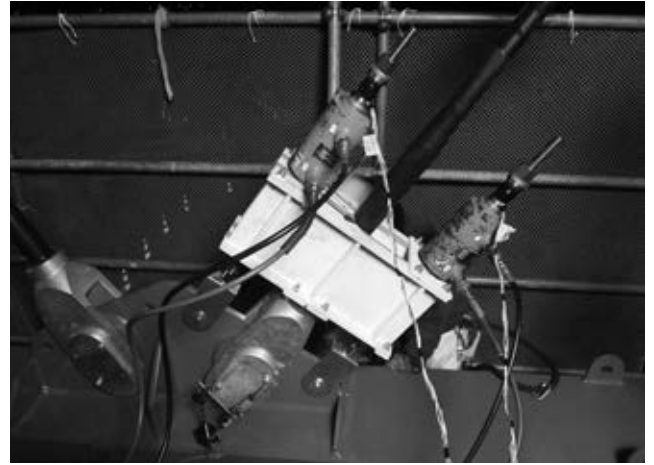


写真2 ケーブル緊張用装置

本工事は、宮崎県国富町向高地区と森永・竹田地区を結ぶ歩道橋であり、九州でも有数の清流である本庄川に架かる橋長 99.6 m、アーチライズが 14.0 m のバスケットハンドル型ニールセンローゼ橋である(写真1)。

接続する PC 橋は既に完成しており、本工事の完成により、平成 24 年 3 月 30 日に渡河部全線が供用開始となった。

本橋の供用により、これまで車道橋を利用して通行していた歩行者が安全に通行できるようになり、近接の小学校の通学路としても有効に利用されることになった。

特長

- (1) 本橋のケーブル定着構造は、アーチ側、補剛桁側の両端ともソケットを用いたピン結合である。このため、補剛桁側の定着部は、ケーブル固定間距離の調整を目的としたシムプレートを挿入することができる構造となっている。斜材ケーブルに導入する張力は、シムプレートの量により調整された。シムプレートの挿入は、写真2に示すケーブル張力緊張用装置を使用して行った。
- (2) シムプレートによるケーブル固定間距離調整量には限界がある。このため、現場での調整を軽減する目的も含め、仮組み立て時にキャンバーが設けられた無応力状態でのケーブル固定間距離を計測し、計測結果を基にケーブル無応力長を算定した。

- (3) 橋梁の性能を確保するため、ニールセン橋などのケーブル構造物においては、ケーブルに所定の張力が導入されているかどうかを確認する必要がある。本工事では張力導入後、ハンマーによる打撃によりケーブルを強制加振させてケーブルの固有振動数を測定し、その測定結果からケーブル張力を算定する振動法を用いて、導入張力の確認を行った。

主要目

工事名：平成 23 年度 まちづくり交付金事業

向高須志田線 森永橋歩道橋(鋼上部工)工事

発注者：宮崎県国富町

工事場所：宮崎県東諸県郡国富町大字森永

橋梁形式：鋼単純ニールセンローゼ橋

橋長：99.6 m

支間長：98.0 m

総幅員：2.8 m(有効幅員 2.0 m)

鋼重：約 140 t

工期：平成 23 年 5 月 9 日～平成 24 年 3 月 30 日

(三井造船鉄構エンジニアリング株式会社)

〔問い合わせ先〕

技術本部 東部技術室

TEL 097 - 593 - 3773 浅野 浩一

加古川中央 JCT 本線橋他鋼上部工工事 - 国道 2 号加古川バイパスを跨ぐ橋梁の製作・架設 -



写真1 完成時全景



写真2 本線橋を跨ぐ門型ベント

本工事は、東播磨地域と北播磨地域を結ぶ「東播磨南北道路」のうち、国道2号加古川バイパス(交通量10万台/日以上)に接続する加古川中央ジャンクションの本線橋及びランプ橋の上部工新設工事である。

三井造船は、2008年7月に本工事を国土交通省近畿地方整備局より受注し、工場製作、輸送、架設、合成床版の施工を行って2012年3月に竣工し、引き渡した(写真1)。

特長

(1) 本線分岐構造に適した少主桁形式の採用

本線橋上り線・下り線は3径間の連続桁で、中央径間にはランプへの分岐があり、各径間で幅員・桁本数が変化する。このため、主桁間隔を大きく調整可能な少主桁形式を採用している。

(2) 長支間の門型ベントを使用したランプ桁の架設

架設はトラッククレーン・ベント工法で行い、加古川バイパスを迂回路へ切り替えることで、架設ヤードを確保した。本線橋上をBランプ橋、Dランプ橋が交差する径間の架設に当たっては、地上から直接ベント支持する場所がなかったため、本線橋の両側より本線橋を跨ぐ工事桁を使用した長支間の門型ベントを設置し、工事桁上にベント設備を設けることで、ランプ桁の架設を行った。鋼桁架設完了後、工事桁は軌条設備を設け、写真2の手前側に約20m横取りし、解体を行った。

(3) 加古川バイパス迂回路切り替えに対応した架設施工

交通量が非常に多い加古川バイパスの交通を確保しながらの施工のため、現道の切り替えが必要となる。現道を迂回路から戻すためには、架設途中でのベント解体、足場解体が必須であり、このため、加古川バイパス直上まで桁が架設された段階で、本線橋、ランプ橋とも床版、壁高欄を仕上げておく必要があった。そこで、本線橋は合成桁

であることから、逐次合成の検討を行った。また、ランプ橋は曲線桁($R=60\text{m}$)のため、架設途中の3径間の支点支持状態では一部に負の反力が発生することが分かった。この負の反力に抵抗するため、また、異常時(風・地震等)の安全性を確保するため、下部工と桁を鋼棒で連結する対策を実施し、現道交通の安全を確保した。

(4) 現道交通を確保した壁高欄施工

ランプ橋の壁高欄施工は、現道交通を確保しながらの施工のため、外側は鋼製型枠が採用された。足場を必要としない施工条件であったが、現道交通の安全をより確保するため、移動防護装置を設置し、壁高欄コンクリートの打設を行った(写真3)。

(5) 地元中学校の現場見学会

職業体験学習として、地元中学生を招き、現場見学会を実施した(写真4、写真5)。

1回目は平成23年7月に2年生(8クラス 320名)を現場に招き、職業体験の一環として、「高速道路ができるまで」と銘打ち、事業者からの事業説明、橋梁下部工、上部工ができるまでの説明を行った。また、地上25mのBランプ橋の上を歩いてもらった。

2回目は平成23年11月に1年生(8クラス 320名)の技術授業の一環として行われた。前日に工事関係者が中学校体育館で本工事の概要について説明を行った後、鋼桁の架設作業を本線橋上より、見学してもらった。

主要目

工事名: 加古川中央 JCT 本線橋他鋼上部工事

発注者: 国土交通省 近畿地方整備局

姫路河川国道事務所

工事場所: 加古川市野口町野口地先から美乃利地先

工期: 平成20年7月2日～平成24年3月30日



写真3 移動防護装置(Bランプ橋)



写真4 Bランプ橋上を見学する中学生



写真5 Bランプ橋架設状況



本線橋上り線

形式：鋼3径間連続活荷重合成少主桁桁橋
 橋長：132.0 m
 支間長：37.2 m + 53.2 m + 40.0 m
 有効幅員：8.660 m ~ 15.745 m(合成床版)
 主要鋼材：SM570, SM490Y, SM400, S10T
 鋼材質量：436 t

本線橋下り線

形式：鋼3径間連続活荷重合成少主桁桁橋
 橋長：132.0 m
 支間長：37.2 m + 53.2 m + 40.0 m
 有効幅員：8.780 m ~ 17.60 m(合成床版)
 主要鋼材：SM570, SM490Y, SM400, S10T
 鋼材質量：489 t

Bランプ橋

形式：鋼4径間連続非合成箱桁橋

橋長：180.0 m

支間長：48.8 m + 54.5 m + 44.5 m + 30.8 m

有効幅員：6.856 ~ 7.540 m(合成床版)

主要鋼材：SM490Y, SM400, S10T

鋼材質量：458 t

Dランプ橋

形式：鋼4径間連続非合成箱桁橋

橋長：166.0 m

支間長：36.75 m + 47.0 m + 45.0 m + 35.75 m

有効幅員：6.835 ~ 7.190 m(合成床版)

主要鋼材：SM490Y, SM400, SS400, S10T

鋼材質量：371 t

(三井造船鉄構エンジニアリング株式会社)

[問い合わせ先]

製造本部 大分工場 生産技術部

TEL 097 - 593 - 3773 岩永 正司

海上架構製作工事

- 直江津 LNG 受入基地向け鋼管トラス形式海上架構の製作 -



写真1 モジュール群全景

三井造船は、株式会社上組より受注した直江津 LNG 受入基地向け海上架構(LNG 受入架構×1, 配管橋×10)を、当社大分事業所で製作、同事業所B岸壁にて架構組立を行った。その後専門業者による機器搭載、配管敷設及び保温工事、電気計装配線工事を経て、仕上げ塗装を行い全架構のモジュール化を完了させ、平成24年3月31日に同事業所B岸壁にて引き渡した。

工事遂行において、材料の大半が鋼管であること、海上設備であるため「亜鉛めっき+塗装(ポリシロキサンエポキシ系)」の重防食仕様が採用されていることから、「精度管理」、**「品質管理」**及び**「工程管理」**が最重要課題であった。

「精度管理」…全ての継手部が溶接構造であったため、早期に最適な伸ばし量、開先形状などの諸条件を調整することにより、最終出来形においては、ほぼ設計値どおりの寸法を実現した。

「品質管理」…パイプコースター(大口径鋼管切断機)の導入による切断精度の向上、3次元CAD(3D-CAD)による施工実施前における構造上の問題点の洗い出しが、非破壊検査の不具合率の低下などに大きく貢献した。

「工程管理」…各ステージでのタクト生産方式の取り組みを目指すことで、モノの流れを常に検証し、手待ち時間の削減に努め、時数削減が図れた。

各モジュールは、平成24年4月2日、工事関係者一同による安全祈願の後、全旋回起伏式起重機船としては最大クラスの1600t吊起重機船(神翔-1600/ 寄神建設株式会社)により、NB 架構から順次積込を開始し、6隻の船団による海上輸送の後、新潟県直江津港に建設中の「直江津 LNG 受入基地」

に設置された。

環境・省エネルギー意識と、原子力の代替エネルギーとしての社会的要求の高まりや原油価格の高騰を背景に国内における天然ガスの需要が増大し、今後も同種の工事増加が見込まれる。

なお、「直江津 LNG 受入基地」は平成26年1月から操業開始の予定である。

特長

- (1) 別府湾という平穏な内海に面した広大なヤードを有している同事業所の特長を最大限に活用し、最盛期200名超の作業員による各種工事を経て、全架構の同時モジュール化を無事故、無災害で実現した。(写真1)
- (2) 鋼管トラス構造の品質確保のためパイプコースターを導入し、部材加工精度と効率の向上を実現した。(写真2,3)
- (3) 3D-CADの活用により、部材干渉チェックと組立要領の事前検討の充実を図り、モジュールごとに組立を行った。(写真4)この結果、工程の遅延は無く、工期内に無事工事を完了させることができた。
- (4) 完成したモジュールは、同事業所の岸壁で引き渡した。(写真5)

主要目

工事名：直江津 LNG 受入基地建設工事の内、プラント建設工事

発注者：株式会社上組

元 請：千代田化工建設株式会社

エンドユーザ：国際石油開発帝石株式会社

工 期：平成22年8月24日～平成24年3月31日



写真2 鋼管トラス製作状況1



写真3 鋼管トラス製作状況2



写真4 NJラック2



写真5 NB架構積込

NB 架構(194 t) : L36.8 × W24.5 × H11.7(m)
 NJ ラック 1(96 t) : L47.0 × W9.0 × H5.2(m)
 NJ ラック 2(144 t) : L46.0 × W9.0+6.5 × H5.2+5.3(m)
 NJ ラック 3(232 t) : L65.4 × W9.0+6.5 × H2.8+5.2+2.0(m)
 PJ ラック(88 t) : L64.6 × W4.5 × H5.6(m)
 中電 1(135 t) : L58.5 × W5.5+6.1 × H5.3+4.1+7.45(m)
 中電 2(81 t) : L48.0 × W5.5+6.1 × H4.1(m)
 中電 3(81 t) : L48.0 × W5.5+6.1 × H4.1(m)
 中電 4(25 t) : L24.0 × W5.5 × H4.1+2.0(m)

中電 5(83 t) : L48.0 × W5.5+6.1 × H4.1(m)
 中電 6(114 t) : L49.0+13.5 × W5.5+6.1 × H4.1+3.1(m)
 ()内は当社所掌の製作鋼重のみを示す。

(三井造船鉄構エンジニアリング株式会社)

[問い合わせ先]

技術本部 沿岸技術室

TEL 097 - 593 - 3773 笠間 慈弘

タンジュン・ジャティ B 石炭火力発電所 3&4 号機 - インドネシアにおける大型土木建築工事の遂行 -



写真1 タンジュン・ジャティ B 石炭火力発電所全景

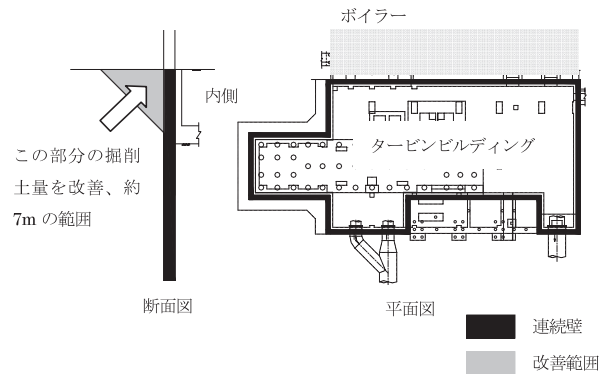


図1 連続壁工法(タービンビルディング地下階)

三井造船は、住友商事株式会社からタンジュン・ジャティ B 石炭火力発電所 3, 4 号機の陸上及び海上土木建設工事、建築物、その他を受注し、2011 年 10 月に 3 号機を、2012 年 1 月に 4 号機を引き渡した。当社の工事工種は、土工、杭打ち工、コンクリート工、鉄骨組立工、道路工、護岸工、棧橋工、突堤工、浚渫工及び煙突施工に大別される。契約上各工種の設計業務も含まれる。

本発電所はインドネシア共和国、ジャワ島、中ジャワ地区に位置する。事業会社は、住友商事が関係会社を通じ 100% 出資している P.T. セントラル・ジャワ・パワーで、同社は、約 20 年間に渡って火力発電施設をインドネシア電力会社 PT. PLN にファイナンス・リースする。

インドネシアにおける当社の歩みは長く、約 30 年前から棧橋工事、鉄構機械工場、造船所、実験設備、駅舎などと着実にインドネシアでの施工実績を伸ばしてきた。約 10 年前には、タンジュン・ジャティ B 石炭火力発電所 1, 2 号機の陸上及び海上の土木・建築構造物、その他の施工を行った。3, 4 号機はこの拡張工事であり、1, 2 号機に隣接している。3, 4 号機は 2012 年 1 月までに商業運転を開始し、1 号機から 4 号機までの総発電容量は 2 640 MW となり、ジャワ島・バリ島エリアの 10% 強を賄う基幹発電所の 1 つとなっている。

特長

(1) 短納期に対応した工期管理

工事開始から商業運転開始までの期間は 39 ヶ月で計画された。通常発電量が 1 000 MW を超えるクラスの発電所が 42 ~ 45 ヶ月の期間であることを考慮すると、かなり短工期の施工であった。ボイラー基礎と石炭棧橋では、それぞれ更に 1 ヶ月、2 ヶ月の工期短縮が求められ、これを実現するために、工程上クリティカルな部分に対する工法を改善、各種作業の効率化を図り対応した。代表的なものは以下のとおりであり、これらの結果により工期短縮を実現した。

- ・タービン建屋外周部に連続壁工法を採用し(図1参照)、ボイラーエリアの工種作業に影響を与えるタービン側の掘削範囲をできるだけ低減した。
- ・ボイラーの配筋作業効率上昇を考慮し、床版頂部での排水系統、支柱周り等の複雑な凹凸形状を D19 以下の鉄筋で対応し、大口径鉄筋の配置形状を単純化した。
- ・石炭棧橋で梁をプレキャスト化し、グルーピング化することにより、現場での作業効率を改善した。

(2) 大規模な土木工事

コンクリート量は海上工事で約 15 000 m³、陸上工事で約 200 000 m³、総量で約 215 000 m³ (含む建築) となり、最盛期には一日当りのコンクリート打込量は 1 000 m³ を超えるため、発電所内にバッチャープラントを 3 基用意した。このコンクリートの品質を向上するために、配合試験が繰り返された。設計上コンクリート強度は 4 段階に分類され、そのうち鉄筋量が多くコンクリート打込が困難な部分には、コンクリート強度を確保した上で、骨材の粒度を小さく調整し、ワーカビリティを確保するなど施工に配慮した配合設計を行った。

(3) スリップフォーム工法を採用したコンクリート製煙突外筒

約 1 ヶ月で高さ 240 m まで立ち上げたコンクリート製煙突外筒にはスリップフォーム工法を採用した。スリップフォーム工法は、東京スカイツリーの心柱の建設にも使用された工法で、迅速な施工と高精度な仕上りが利点となっている。施工にはコンクリートの安定した供給が必要となるため、1 基のバッチャープラントを専用で使用した。

(4) 多種多様な骨材を用いた大規模鉄骨工事

タービンビルディングと中央電気制御室は、大小様々な鉄骨部材により構造が成り立っている。総量で約 4 000 トンの鉄骨部材を使用した(図2参照)。類似した形状の鉄骨が多数存在しているため、鉄骨部材の管理が重要となる。このため、設計段階に必要な 3 次元のモデルや図面だけでなく、建物や構造物の施工管理段階に必要なデータを自動的に作成で

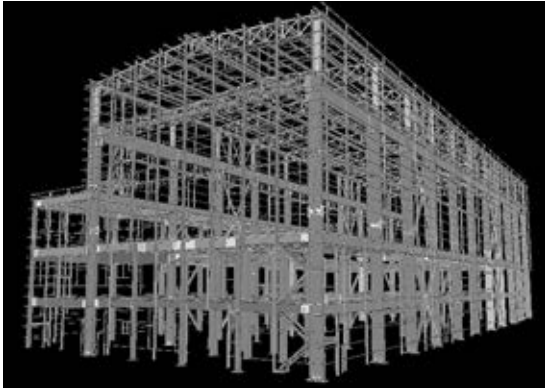


図2 タービンビルディング3号機側(Tekla Structures)

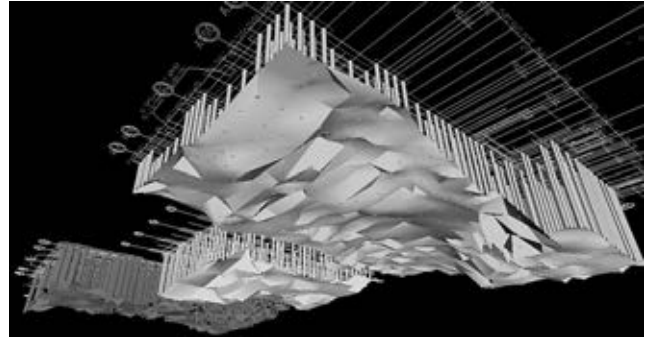


図3 PC杭打設結果から予想された支持地盤面(3号ボイラー：手前，中央電気制御室：中央，4号ボイラー：奥)

きるソフトウェアTekla Structuresを導入した。これにより、各部材の搬入管理、鉄骨組立が容易となり、計画通りの施工が可能となった。

(5)複雑な岩盤地形に対応した基礎工事

タービンビルディングなどの基礎となるPC杭の延べ長さは約80000mを超えた。主要な部分のPC杭の長さ、使用本数は以下のとおりである。これらの値は工事開始前の土質調査報告書に基づき設計を行い決定した。PC杭打設当初、設計PC杭長と打設PC杭長にかなり差が生じた。これは支持地盤面が変化に富んだ形状であることが原因と考えられたため、スウェーデン式サウンディング試験により各ボーリングデータ間の補間を行い、岩盤の地形を予測しPC杭の損耗率を減少させることにより、PC杭余長を改善できた。図3はボイラー3号機、4号機、中央電気制御室におけるPC杭打長と支持地盤位置関係を示したものである。

- ・タービン建屋：約15000m(1200本)
- ・ボイラー：約13000m(1400本)
- ・中央電気制御室：約2700m(240本)
- ・煙突：約4000m(400本)

おわりに

今後も海外大型発電所土木工事について、本実績を基に強気に推進して行く計画である。

主要目

工事範囲：海上及び陸上土木工事、建築工事、その他

工期：2008年7月～2012年1月

納入設備

(1)基礎及び建屋躯体工事

- タービンビルディング
：約8100m²
- 中央電気制御室：約1800m²

(2)基礎工事

- ボイラー：約9500m²
- 電気集塵施設：約2000m²
- 脱硝脱硫施設：約500m²
- 変圧器：約850m²
- 500kv変電所：約8200m²
- 150kv変電所：約2700m²
- 中継鉄塔：1基

(3)排気塔工事

- 煙突：高さ約240m(基礎部分含む)

(4)搬送関連設備

- 石炭運搬用ベルトコンベア及び制御塔
：約4.9km, 10塔
- 貯炭場：約15.6ha
- 石炭棧橋延長：約2000m(石炭荷受架台含む)
- ライムストーン棧橋延長
：約260m(ライムストーン荷受架台含む)
- アッシュサイロ：高さ約30m, 2基
- ライムストーンサイロ
：高さ約30m, 1基

(5)その他主要設備

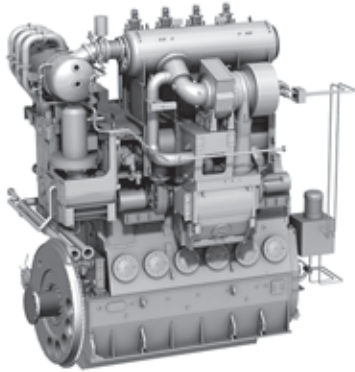
- 循環水ポンプ室：約2000m²(建屋、電気室含む)
- 水処理施設：約8500m²(建屋、タンクなど主要施設)
- 汚水処理施設：約8800m²(建屋、タンクなど主要施設)
- 循環水排水路：約600m
- ヘリポート：3面

(エンジニアリング事業本部)

〔問い合わせ先〕

- 第2設計部
TEL 03-3544-3545 浦 浩志

船舶用ディーゼルエンジン NOx 三次規制対応 世界初のビルトイン(エンジン一体)型 EGR で規制値クリアを確認



三井造船株式会社は、船舶用大型低速ディーゼルエンジンにおいて、世界初のビルトイン方式による排気ガス再循環システム(Exhaust Gas Recirculation : 以下 EGR)により NOx 3 次規制に対応できることを確認しました。

国際海運の世界では、今後 IMO (国際海事機関)による環境規制が順次強化されます。船舶から排出される NOx(窒素酸化物)についても 2000 年からの一次規制で 17g/kWh 以下、2011 年からの二次規制では 14.4 g/kWh 以下、そして 2016 年からの三次規制では、特定海域で一次規制値比 80% 減となる 3.4 g/kWh 以下を満たす必要があります。

一昨年当社は、玉野事業所機械工場内に世界最大級のテスト用ディーゼルエンジンを設置し、実機ベースで NOx 低減技術をはじめ各種環境規制対応技術開発および実証試験を進めてきました。

このたび NOx 三次規制値をクリアした当社の EGR は、エンジンからの排気ガスの一部をエンジンに再循環させ、エンジンの燃焼温度を下げることにより NOx 排出量を低減するシステムです。本システムは、世界初のビルトイン方式であることが大きな特長です。EGR の機器をエンジンに一体装備することにより各種 NOx 規制対応技術の中では、機関室設計への影響が最も少なく、最もコンパクトなシステムであるといえます。

当社は、船舶用大型低速ディーゼルエンジンの国内トップメーカーとして、NOx 規制だけではなく、CO₂ 削減技術(省エネ技術)の技術開発も進めています。既に確立した技術であるガス燃料エンジン(ME-GI)も含めた各種製品ラインアップを揃え、今後もお客様の多様なニーズに応えていきます。

[問い合わせ先] 広報室 乾 電話 : 03 - 3544 - 3147

三井造船技報編集委員会

| | |
|-----|-------|
| 委員長 | 中谷 龍男 |
| 委員 | 木澤 厚夫 |
| | 福岡 哲二 |
| | 小野 純二 |
| | 倉山 潔 |
| | 速水 礼 |
| | 奥 幸之介 |
| | 穴 倉 進 |
| | 鎌田 勤也 |
| | 神田 伸靖 |
| | 兼本 浩 |

三井造船技報

第 206 号

2012 年(平成 24 年)7 月 20 日発行
(年 3 回発行)

| | |
|-----|--|
| 発行人 | 入江 泰雄 |
| 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 |
| 印刷 | 株式会社 三造ビジネスクリエイティブ 〒261 - 7128 千葉県千葉市美浜区中瀬 2 - 6 - 1 |

三井造船技報 第 206 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が、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 でお知らせ頂きたくお願い申し上げます。

敬具

キ リ ト リ 線

FAX : 03 - 3544 - 3125

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 206 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) 本号で興味のある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

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) | 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 | 〒812-0011 | 福岡市博多区博多駅前1丁目1番1号(博多新三井ビル) | TEL 092-411-8111 |
| 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 | | | |
| 玉野技術開発センター | 〒706-0014 | 岡山県玉野市玉原3丁目16番1号 | TEL 0863-23-3001 |
| 千葉技術開発センター | 〒290-8531 | 千葉県市原市八幡海岸通1番地 | TEL 0436-41-1110 |
| 基盤技術センター | 〒706-0014 | 岡山県玉野市玉原3丁目16番1号 | TEL 0863-23-3101 |
| 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 |
| つくば研究センター | 〒104-8439 | 東京都中央区築地5丁目6番4号 | TEL 03-3544-3266 |
| 海外事務所 | シンガポール, 北京, ジャカルタ, ハノイ, クアラルンプール | | |
| 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(U.S.A.)株式会社 三井造船(上海)商貿有限公司 | | |

タンジュン・ジャティ

インドネシア ジャワ島

インドネシアの 経済を支える

タンジュン・ジャティB石炭火力発電所 3&4号機

インドネシアでは近年の急速な経済発達に伴い、将来的に深刻な電力不足が懸念されていました。そうした背景を受け2006年にインドネシア政府は、ジャワ島各地に発電所の計画を打ち出しました。

タンジュン・ジャティB石炭火力発電所3&4号機は、その計画の1つであり、中部ジャワ州の北東沿岸部に位置し、既に完成している既設1&2号機に隣接した形で建設されました。

施工中の3&4号機

1&2号機



インドネシア ジャワ島の電力不足を改善

1号機から4号機までの総発電容量は2640メガワットとなり
インドネシア ジャワ島・バリ島エリアの10%強を賄い、
基幹発電所の1つとなっています。

詳細は、本紙p.36をご参照ください。