

三井 造船 技報

平成 23 年 2 月 第 202 号

MITSUI ZOSEN TECHNICAL REVIEW No. 202 2011



インドネシア国向けフルミッション型操船シミュレータ



表紙説明

インドネシア国向けフルミッション型操船シミュレータ

三井造船は、インドネシア国内での海事教育訓練装置として統合フルミッション型操船シミュレータ（Full Mission Type Ship Simulator：FMSS）を、日本政府の円借款供与案件である「海事訓練学校整備事業」の一環として受注し、2010年1月にジャカルタのBP3IP校、セマランのPIP校及びマカッサルのPIP校へ引渡した。

FMSSは操船シミュレータシステム（Ship Maneuvering Simulator System：SMS）、エンジンルームシミュレータシステム（Engine Room System：ERS）及び、実機ディーゼルエンジンプラント（Diesel Engine Plant：DEP）の3システムから構成される統合型のシステムである。

SMSはERS及びDEPとリンクされているため、船橋部と機関部が連携した練習船での訓練と同等のシミュレータ訓練が、練習船よりも、より効率的に安全に、しかも低コストで可能である。

Cover

The Full Mission Type Ship Simulator for Indonesia

Mitsui Engineering & Shipbuilding Co., Ltd. (MES) has developed a full mission type ship simulator (FMSS) as part for Maritime Training School Environment Management Project in Indonesia under Japanese ODA (Official Development Assistance) Program and delivered such simulator respectively to BP3IP in Jakarta, PIP Semarang and PIP Makassar in January 2010.

FMSS is an integrated system that is composed of three elements, i.e. ship maneuvering simulator system (SMS), engine room simulator system (ERS) and diesel engine plant (DEP)

SMS is linked with ERS and DEP. Therefore, the simulator training can be performed just like on the actual ship by a joint operation with bridge and engine room. This training by the newly developed simulator is safer and more effective at a lower cost than that on the actual training ship.

三井造船技報

2011年(平成23年)2月・第202号

目次

技術論文・報告

インドネシア国向けフルミッション型操船シミュレータの開発	1
上入佐 光 五十嵐和之 青木 隆司 草ヶ谷誠一 岸本 隆 白井 潤二	
高炉用軸流圧縮機の高濃度酸素富化への対応	8
石原 修二 小野修一郎 田杭 隆一 沢井 幸光	
作業観測法を適用した労働安全評価手法の開発	13
篠田 岳思 田中 太氏 藤原 和俊 佐々木 昭 志水 栄一 内村 俊昭 三宅 真一 中井 孝之 岡田 実 尾崎 昭生 太田 巧	
デジタル符号方式レーダの開発	20
土井 恭二 木村 憲明 弓井 孝佳	
蛍光寿命フローサイトメータを用いた 創薬アッセイに向けた生細胞内 FRET の高精度評価	26
山口 卓二 林 弘能 伊藤 彰英 中田 成幸	

製品・技術ニュース

西大津 BP 藤尾奥町高架橋鋼上部工事 - 狭あいな場所での桁架設 -	33
水郷大橋工事に用函体製作工事 - 組替え可能な河川内仮締切用鋼製函体の製作 -	34
浮島 2 期廃棄物埋立 B 護岸ケーソン製作その 3 工事 - ハイブリッドケーソン 5 函完成 -	35
風力発電研修施設建設工事完成 - 拡大する風力発電設備のメンテナンス強化に寄与 -	36

Home Page News

「三浦バイオマスセンター」(愛称:「MKE BIMA ステーション三浦」)が完成 - 地域の特性を生かしたバイオマス(農水産物残渣)の利活用に貢献 -	37
--	----

MITSUI ZOSEN TECHNICAL REVIEW

No. 202 FEBRUARY 2011

CONTENTS

Technical Paper and Report

Development of Full Mission Type Ship Simulator for Indonesia.....	1
<i>Hikaru KAMIIRISA, Kazuyuki IGARASHI, Takashi AOKI, Seiichi KUSAGAYA, Takashi KISHIMOTO, Junji SHIRAI</i>	
A Study on Safety of Axial Compressor for Highly Oxygen-Enriched Blast Furnaces	8
<i>Shuji ISHIHARA, Shuichiro ONO, Ryuichi TAGUI, Yukimitsu SAWAI</i>	
Development of Methodology of Risk Assessment for Occupational Safety in Using Work Observation Technique	13
<i>Takeshi SHINODA, Takashi TANAKA, Kazutoshi FUJIWARA, Akira SASAKI, Ei-ichi SHIMIZU, Toshiaki UCHIMURA, Shin-ichi MIYAKE, Takayuki NAKAI, Minoru OKADA, Akio OZAKI, Takumi OHTA</i>	
Development of Radar Using Digital Coded Signal	20
<i>Kyouji DOI, Noriaki KIMURA, Takayoshi YUMII</i>	
High Accurate Evaluation of Live Cell FRET Assay for Drug Discovery with Fluorescence Lifetime Flowcytometer	26
<i>Takuji YAMAGUCHI, Hironori HAYASHI, Akihide ITOH, Shigeyuki NAKADA</i>	
Products and Technology News	33, 34, 35, 36
Home Page News	37

Published by

MITSUI ENGINEERING & SHIPBUILDING CO., LTD.

3-16, Nihonbashi 1-chome, Chuo-ku, Tokyo 103-0027, JAPAN

インドネシア国向けフルミッション型操船シミュレータの開発

上 入 佐 光* 五十嵐 和 之* 青 木 隆 司*
草ヶ谷 誠 一* 岸 本 隆* 白 井 潤 二**

Development of Full Mission Type Ship Simulator for Indonesia

Hikaru KAMIIRISA, Kazuyuki IGARASHI, Takashi AOKI, Seiichi KUSAGAYA, Takashi KISHIMOTO, Junji SHIRAI

Mitsui Engineering & Shipbuilding Co., Ltd.(MES)and its subsidiary, Akishima Laboratories(MITSUI ZOSEN)Inc., have jointly developed full mission type ship simulators and delivered them to Ministry of Transportation Education and Training Agency in Indonesia. These simulators have been developed based upon many technical achievements in the manufacture of compact ship handling simulators and onboard ship handling simulators.

The new simulator is composed of three elements, i.e. ship maneuvering simulator system, engine room simulator system and diesel engine plant. The simulator training can be performed just like on the actual ship by a joint operation with bridge and engine room, that is significantly featured on this system. Among these three elements, the composition, functions and math model of ship motion of the ship maneuvering simulator which is originally developed by MES and Akishima Lab. are introduced in this paper.

三井造船と三井造船昭島研究所は、これまで培ってきた小型船舶操船シミュレータやオンボード操船シミュレータの開発技術に基づき、インドネシア国の海事教育訓練用として統合フルミッション型操船シミュレータを開発、納入した。本シミュレータは操船シミュレータシステム、エンジンルームシミュレータシステム、実機ディーゼルエンジンプラントから構成されており、ブリッジと機関室が連動して実船さながらの訓練ができることが大きな特長となっている。本報では、これら3システムの内、当社独自の技術で開発した操船シミュレータの構成、機能、運動モデルなどについて主に紹介する。



(a)ジャカルタのBP31P校(6階建てビルの4階に操船シミュレータを設置)



(b)ブリッジ内概観(スクリーン上はシドニー港の景観)

写真1 インドネシア国の海事訓練学校へ納入された操船シミュレータ

Ship Maneuvering Simulator Delivered to Ministry of Transportation Education and Training Agency in Indonesia

* 株式会社三井造船昭島研究所

** 機械・システム事業本部 機械工場 産業機械設計部

1. まえがき

三井造船は、インドネシア国内での海事教育訓練装置として統合フルミッション型操船シミュレータ(Full Mission Type Ship Simulator: FMSS)を、日本政府の円借款供与案件である「海事訓練学校整備事業」として受注し、2010年1月に写真1(a)に示すジャカルタのBP3IP校、セマランのPIP校及びマカッサルのPIP校の海事訓練学校3校へ引渡した。本装置は、国際社会で要求されるより質の高い船員を早期に育成するために、総合的な運航訓練だけでなく、保守訓練についてもより実践的な訓練ができることを目的として開発された。訓練装置は、乗船経験のない学生に対する訓練だけでなく、乗船経験のある船員の再教育にも理論や海上法規についての座学と併用して使用される。

図1に示すように、FMSSは操船シミュレータシステム(Ship Maneuvering Simulator System: SMS)、エンジンルームシミュレータシステム(Engine Room Simulator System: ERS)及び実際に運転可能な実機ディーゼルエンジンプラント(Diesel Engine Plant: DEP)の3システムから構成される統合型のシステムである。なお、PIP校2校に納入したものはSMSとERSから構成されており、SS(Ship Simulator)と称している。

FMSSとSSの相違点は、DEPの有無と円筒スクリーンの水平視野角がFMSS 210°、SS 90°の違いであり、その他は同じであるため、本報では規模の大きいFMSSについて記述する。

FMSSの構成要素であるSMSは、ERS及びDEPとリンクしており、相互にデータを送受信し、連動して作動するようになっている。これにより、船橋(ブリッジ)部訓練生と機関部訓練生が同時に連携して総合的な訓練ができ、練習船での訓練と同等の訓練が、練習船よりも、より効率的に安全に、しかも低コストで行える。また、船舶の安全運航のため、乗務員・設備・情報などブリッジにおいて利用可能なあらゆる資源(リソース)の有効活用(Bridge Resource Management: BRM)や機関室での資源有効活用(Engine Room Resource Management)などの個々の訓練に加え、船の全体的な訓練、いわゆる“Ship Resource Management”も可能となる。なお、これら3システムは従来と同様、各々個

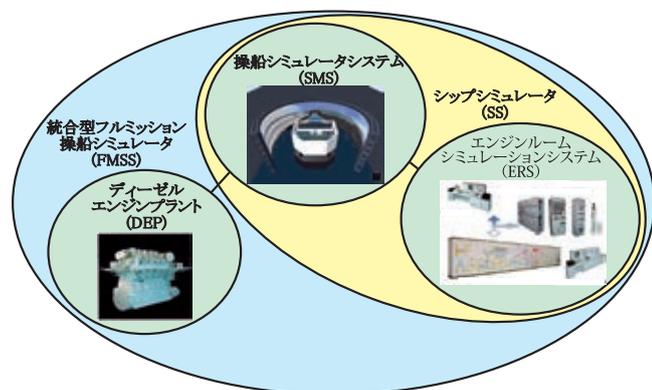


図1 統合フルミッション型操船シミュレータシステムの構成
System Configuration of Full Mission Type Ship Simulator

別に作動でき、訓練できるようにもなっている。

SMSは写真1(b)に示す約30m²のブリッジ、半径6mの円筒スクリーン、実機レーダ、電子海図情報表示システム(Electronic Chart Display and Information System: ECDIS)などから構成される本格的なシミュレータである。シンガポールなどの8つの代表的な航路や港湾をスクリーン上に投影して、巨大タンカー(Very Large Crude Oil Carrier: VLCC)から客船まで9種の船舶の離着岸操船訓練や多くの船舶が行き交うマラッカ海峡などでの操船訓練が可能である。

ERSは2サイクル低速ディーゼルエンジンを中心に、全ての機関室内補機を模擬するフルミッションエンジンシミュレータシステムである。機関室内システムの状態や主機・補機特性などの把握、非常時を含む種々な状態に対する機関室内での訓練、機関室監視操作訓練、更に訓練評価用データ作成等を目的として当社と寺崎電気産業株式会社が新たに開発したものである。

DEPは水制動機を負荷とした実際に運転可能な船用2サイクル低速ディーゼルエンジンとそれに必要な補機類及び発電機システムから構成されており、シミュレータでは訓練しづらい保守、修理、実機操作などの実地訓練及び実ディーゼルエンジン・補機の性能特性の把握を主目的として導入された。

ERS及びDEPの主機は、外航船向けに最も多く使用されている三井・MAN B&Wディーゼルエンジンである。

2. 訓練シナリオと必要な機能

船舶運航に必要な技術を紹介し、シミュレータを用いた訓練シナリオとその訓練を実現するためにシミュレータに求められる機能について説明する。

2.1 船舶運航に必要な技術

以下に、船員の訓練、資格などの基準を定めたSTCW条約¹⁾に基づき分類整理された、船舶運航に必要な要素技術とその技術内容²⁾を示す。

見張り

他船などの移動物標やブイなどの固定物標を認識・識別し、その探知した物標に関する方位、距離、速度などの情報を収集し、その将来の動向を予測する技術。

船位測定

目視やレーダーなどの機器により物標を認識・選定し、海図などを利用して船位を求める技術。

操縦

目標針路や航路に対して、舵、主機などの操作により針路、速度、船位制御を行う技術。

機器取扱

見張り、船位測定、操縦などに使用する機器の取扱いに習熟し、適切に使用する技術。

情報交換

ブリッジ内、船首尾配置員、機関室などの船内、あるいは船外と情報交換を行う技術。

法規遵守

海上衝突予防法などの海上交通法規に従って航行する技術。

計画

航行環境条件に関する情報を収集し、操船計画や航海計画を行う技術。

非常事態

主機故障及び操舵機故障、救難活動などに対し適切に対処する技術。

管理

複数の技術要素をいかに効果的に適用するかという技術管理と自己を含め乗組員の持っている力を最大限に引き出し、チームとしての能力を高めることを目的とする組織を管理する技術。

2.2 操船シミュレータの訓練シナリオ

三級から一級までの海技士資格に応じて求められる訓練対象技術は高度になる。以下に、海技士資格別に必要な要素技術と対応する訓練シナリオを示す。

2.2.1 三級レベル

船位測定、操縦及び計画の要素技術を訓練するために、沿岸航海中の設定航路の航行、設定航路からの自船偏位量の確認及び変針計画立案と実行の訓練シナリオが必要である。

また、見張り、操縦、情報交換及び法規遵守の要素技術を訓練するために、沿岸航海中の2船間見合い関係の把握、法規に従った適切な操船の実施、避航操船に伴う自船偏位量の確認及び復針計画の立案の訓練シナリオが必要である。

2.2.2 二級レベル

見張り、操縦、情報交換及び法規遵守の技術を訓練するために、夜間も含めた波、風、潮流などの外力条件下での設定航路航行や避航操船の訓練シナリオが必要である。

2.2.3 一級レベル

全ての操船技術要素を訓練するために、減速を含む避航操船、外力条件下での輻輳海域航行及び指定錨地投錨、パイロットステーションへのアプローチ、タグボートによる離着岸操船、非常事態への対応及びチーム訓練シナリオが必要である。

2.3 シミュレータに求められる機能

2.2の訓練シナリオを再現するためにシミュレータに求められる主な機能は、次のとおりである。

ブリッジ内の操舵スタンド、エンジンコンソール、レーダなどの航海計器類及びコミュニケーション機器などは、実船同様の操船環境を再現すること。プロペラ回転数や船速などの計器類の表示は、景観や船体運動と同期が取れていること。

スクリーン上に海域の景観や他船がリアルに投影され、ブイなどの灯火形象の位置や属性が忠実に再現されていること。

波、風、潮流などの外力に対する自船の運動が実際と同様に再現され、また岸壁との干渉、浅水影響や2船体干渉影響が忠実に再現されること。

自船エンジン音や自他船の汽笛は臨場感良く、他船汽笛は距離と方向を再現すること。また、ブリッジを振動させて、エンジン振動などを模擬すること。

教官が容易にシミュレーション訓練を管理できること。すなわち、シナリオの作成とその選択、自船選択、他船選択、

昼夜及び波、風、潮流、視程、天候などの環境設定、他船の制御、タグ操船、故障設定、訓練監視、ブリッジなどとのコミュニケーション、訓練結果出力、接続モードの切替えなどが容易にできること。

訓練前にアプローチ時の景観、他船状況、航路標識、顕著な物標など、シナリオ全体の説明ができること(ブリーフィング)。また、訓練後に、訓練結果を再現して自他船の見合い状況や自船航跡などの確認が行えること(デブリーフィング)。

システムは容易に起動でき、かつシャットダウンできること。また、エイジングや電圧変動など、設置場所固有の環境に対してもロバストであること。

3. 操船シミュレータシステム(SMS)の構成

FMSSの主要構成要素で、2.で記述した機能を満足するために、当社が独自に開発したSMSについて以下に述べる。

3.1 ハードウェア構成

図2に示すように、本SMSはブリッジ室、マシン室、スクリーン室、教官室及びブリーフィング室に分散されている。

写真1(b)に示すように、ブリッジ室内には現実感を持たすため、ステアリングスタンドやレーダなどの実機の航海装置を配置した。

訓練生の挙動を監視するための赤外線式カメラ(Closed Circuit TV : CCTV)や環境音再生用のスピーカも設置した。

ブリッジ床下には実船の振動を模擬再生するためサブウーファを設置し、実船と類似した振動スペクトラムが再現できるようにした。

シミュレータシステムを容易に扱うために、全てのコンピュータ(PC)をマシン室に集中して収納した。図2に示すように、各PCはLANでネットワーク構成されている。また、電圧変動や不意の停電などに備え、全てのPCにはバックアップ電源が1台付属されている。

スクリーンルームには7台のプロジェクタが設置されているが、メンテナンス時にアクセスし易いように、床上に同心円状の配置として、かつ同じ打上角とした。これにより、故障時の入れ換えが容易となる。また、室温が30℃を超えるため、冷却用ダクトを配置した。

次に、リアルな景観を再現するために採用したプロジェクタ及びスクリーンについて述べる。

3.1.1 プロジェクタの選定

プロジェクタの投影方式には、液晶とDLP(Digital Light Processing)が多い。複数のプロジェクタでシームレスな映像を投影するために、高価だが色むらの少ないDLP方式を選定した。円筒スクリーンに複数のプロジェクタで投影するマルチプロジェクションでは、エッジブレンディング処理と幾何補正が必要となる。本SMSでは、これらの機能を内蔵するCHRISTIE社製のMATRIX 3000を採用した。また、ブレンディングフィルタ機構を採用して、夜間の景観でオーバーラップ領域が明るくなることを防止した。

3.1.2 スクリーンの製作及び設置

スクリーンにはフレキシブル型とソリッド型があるが、フ

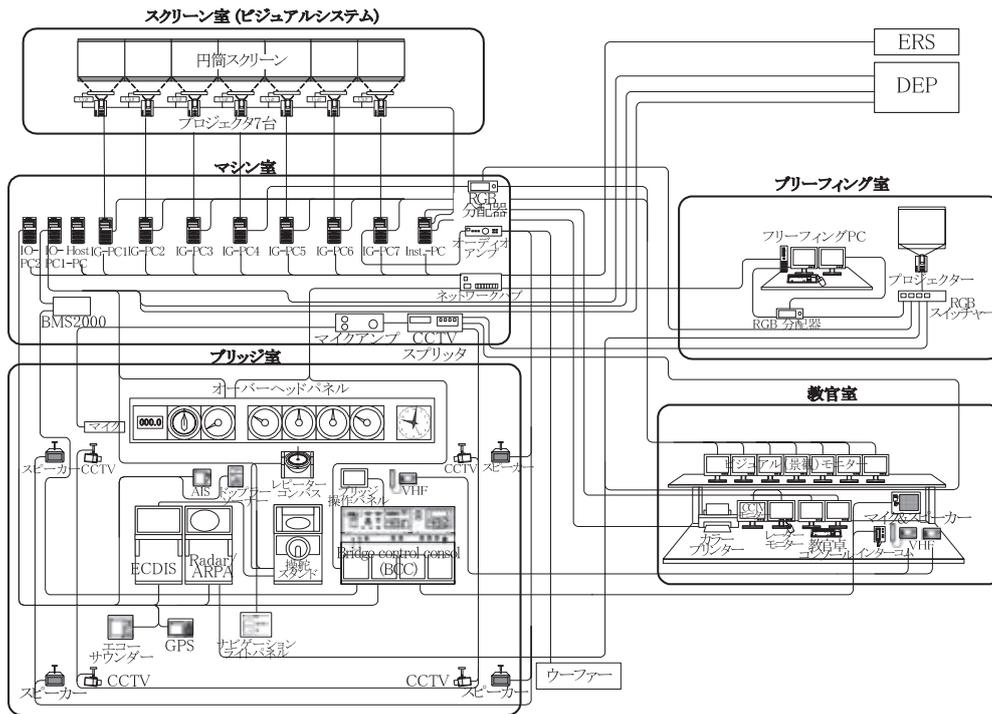


図2 操船シミュレータシステムのハードウェア構成
Hardware Composition of Ship Maneuvering Simulator System

レキシブル型は中央付近が鼓状にへこむ傾向にあり、幾何補正を複雑とするためソリッド型とした。また、設置場所が高湿多湿の熱帯地域であり、木材では品質管理が難しいためアルミ材を用いた。

3.2 ソフトウェア構成

教官が容易にシミュレーション訓練を管理できるよう、SMSのソフトウェアは図2のハードウェアの構成にほぼ対応した構成となっている。各モジュールの機能について、以下に説明する。

3.2.1 教官卓モジュール

訓練シナリオの選定や波、風、潮流などの訓練環境設定を支援する。

3.2.2 ホストモジュール

6自由度の自他船の運動計算や他のPCに内蔵されているモジュールを統合管理する。

3.2.3 IG(Image Generation)PC用モジュール

訓練海域の景観、設定された気象、海象、ブイや他船をプロジェクタへ送信する機能の他、エンジン音などの音響を生成する。着岸時のフェンダー効果の表現や他船などとの衝突判定を行う。

3.2. IO(Input Output)PC1用モジュール

操舵スタンドや航海灯パネルを制御する他、ホストモジュールからの信号を受けてオーバーヘッドパネルを制御する。

3.2.5 IO(Input Output)PC2用モジュール

ホストモジュールと信号をやりとりしてレーダやECDISなどの航海計器を制御する。

3.2.6 ブリッジ操作パネル用モジュール

タグ操船、係船時のウインチ操作、投錨時のウィンドラス操作、自船の形象や霧笛操作が行えるほか、視野角を上下左右に切り替えることができる。

3.2.7 フリーフィング用モジュール

本SMSでは通常のフリーフィング機能を拡張して、訓練中に過去の訓練データを再生したり、別のシナリオを再生して編集したりできる。

操船シミュレータシステム(SMS)の機能

シミュレーション訓練を容易に行えるか否かは、教官室で可能な機能に大きく左右される。そのために配慮した機能について、以下に説明する。

1 教官卓の機能

教官卓操作画面は、写真2に示すように、操作性を高めるため2台のディスプレイから構成される。左側の画面(操作画面)は、環境、タグ、ムアリング、ウィンドラス操作、マルファンクションの操作を、右側の画面(チャート画面)では、訓練海域、自他船航跡の表示、他船ウェイポイント(変針位置情報)の追加、削除、移動や船速の変更などができるよう配慮されている。

以下に教官卓の機能の内、特に工夫したシナリオ編集機能、印刷機能及びデスクトップトライアル機能について説明する。

1.1 シナリオ編集機能

訓練に使用するシナリオデータは、コンポーネントと呼ばれる自船情報、他船情報、環境情報、海域情報のシナリオ要素を組み合わせることで、容易に制作が可能となっている。



写真2 教官卓

(上段：景観画面モニター，下段左側から CCTV 画面，レーダモニター，教官卓操作画面，チャート画面，VHF)

Instructor's Console

(Upper Row: Visual Monitor, Lower Row from Left: CCTV Monitor, Radar Monitor, Instructor's Operation Display, Chart Display, VHF)

1.2 印刷機能

画面上のタブ操作で、つぎのような情報が印刷される。“Summary タブ”では訓練海域のチャート、自船情報や環境条件などが印刷される。“Trajectory タブ”では、航跡が時間情報と共に印刷される。“Time History タブ”では、主機回転数や舵角などの操船データの時系列が印刷される。操船データは別々にあるいは同じグラフ上に、まとめて描画することもできる。

1.3 デスクトップトライアル機能

教官が制作したシナリオを即座にチェックするための機能で、教官卓 PC を立ち上げるだけで、ブリッジ内のステアリングスタンドや制御卓(Bridge Control Console : BCC)を使用せず、教官卓画面上のスライドバーで自船を操船できる。

2 VHF(Very High Frequency)環境音機能

教官が他船や海上交通センタの役を務めて VHF によるコミュニケーション訓練を行うが、本 SMS では、より臨場感を再現すべく、VHF 通信時の背景(他船交信)音を用意した。電波法上の問題から実船での会話を記録して使用できないため、標準海事通信用語集³⁾(Standard Marine Communication Phrases : SMPC)に基づき交信シナリオを作成し、英語、インドネシア語、日本語で交信した会話を記録して、訓練中に VHF 交信に重畳できるように工夫した。訓練中の VHF 交信の記録・再生も可能である。

5. 運動計算モデル

操舵あるいは外力による自船の運動が実際と同様に再現されるか否かは、シミュレータ訓練の有効性に関わる大きな問題である。本 SMS では、当社がこれまで数多くの模型試験や実船試験、シミュレーション計算結果に基づき検証してきた運動計算モデルを採用している⁴⁾。

5.1 自船運動モデル

自船の操縦運動数学モデルは、各種船型、載貨条件や環境

表1 自船モデル一覧
List of Own Ship Models

船種	載貨重量トン (ton)	船長 (m)	サイドビュー
一般貨物船	18 290	143.0	
コンテナ船	53 630	283.0	
セミコンテナ船	3 650	92.0	
バラ積み貨物船	27 760	168.0	
巨大タンカー (VLCC)	258 900	315.0	
LNG 運搬船	71 500	280.0	
Ro-Ro 船	10 600	130.0	
フェリー	5 020	141.0	
客船	-	78.0	

外乱などの多くの要素を考慮した数値シミュレーション計算を行うことによって、6自由度(Surge, Sway, Yaw, Heave, Pitch, Roll)の運動で表現されている。

数学モデルにおける外力としては船体に働く流体力、プロペラによる推進力、サイドスラストによる推力、舵に働く流体力、船体上部構造に働く風圧力、タグボートによる補助力、係留索やアンカーチェーンの張力が考慮されている。本 SMS では、表1に示す9種類の船型について、満載及びバラ状態の自船モデルを用意している。

5.2 操船シミュレーション

本 SMS では以下のような様々な局面での操船シミュレーションを行うことが可能である。

5.2.1 タグボートオペレーション

最大で6隻のタグボートを同時にコントロールしながら、自船の離着岸操船を補助することができる。なお、タグボートは、馬力の異なる4種のタグボートの中から任意に選択可能である。

5.2.2 離着岸オペレーション

船体に働くフェンダー反力や係留ロープ張力によって影響を受ける船体運動の再現は、離着岸操船において非常に重要な要素である。本 SMS では、それら諸要素を忠実に再現することにより、本格的な離着岸訓練を行うことができる。

5.2.3 アンカリングオペレーション

船種ごとに、アンカー質量、チェーン長さ、密度、ウィンドラスの巻き上げ・繰り出し速度が設定されており、アンカーの把駐力及びアンカーケーブルと海底との摩擦力を考慮することにより、アンカリングオペレーションにおける自船の運

動を表現している。また、強風、強潮流などによって生ずるアンカードラッグ(引きずり)も再現されるモデルとなっている。

5.3 港内操船訓練

主に港内操船時に生じる干渉による運動の変化が再現でき、これらに対応した訓練が可能である。

5.3.1 バンクとの干渉影響

図3に示すように、バンク(岸壁を含む堆積)の近くを通過する際、船体はバンク方向へ引き込まれてバンクと反対側に船首を振る現象が生じるが、その現象を忠実に再現できるモデルとなっている。船速が大きい場合や、水深が浅い場合にはこの現象は顕著となる。

5.3.2 浅水影響

船底と海底の距離が短くなると、船体の沈下や姿勢変化(トリム)が生じることが知られている⁵⁾。また、造波抵抗も増加し、プロペラ効率も低下するため船速も減少する。

更に、上記現象のほか、浅水域で船が旋回運動する際、船体に働く流体力の変化や船体とプロペラ及び舵間の干渉影響の変化が起因して、旋回径が大きくなることが知られている。本SMSでは浅水影響を忠実に再現している⁴⁾。計算結果の例は図4に示すとおりであり、浅水影響によって旋回半径が大きくなっている。

5.3.3 船体干渉影響

2船間の距離が近いと、船体同士の相互干渉が生じる。例えば、自船と他船が近接した状態で追い越しと被追い越しの関係にある場合、互いに引き寄せられる力が終始、船体に作用する一方で、2船間の位置関係の推移に伴って船体に作用する回頭モーメントは複雑に変化するため、適切な保針操船が求められる。狭い水路内、浅水域ではその現象は顕著となる。本SMSでは、そのような現象を体験し、衝突防止の操船訓練を行うことができる。

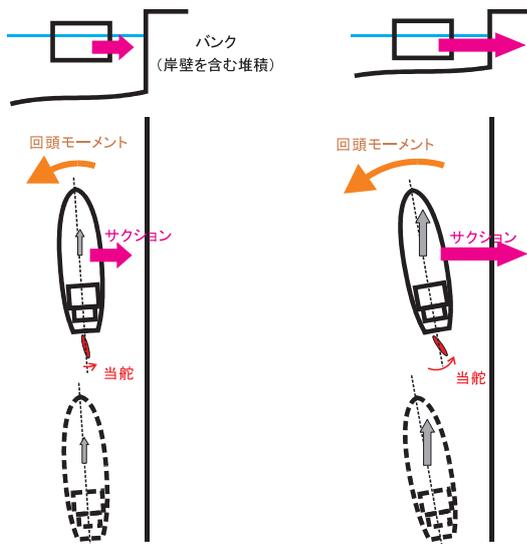


図3 岸壁との干渉影響(バンク影響)
Effect of Interference with Quay(Bank Effect)

6. データベース

より実践的な訓練を可能とするために、訓練海域、主要航路及び港湾における海底地形、ブイや灯台などの航行援助施設(Navigational Aids)情報をデータベースとして装備した。

6.1 訓練海域

開発した訓練海域は、表2に示す8海域である。範囲は30海里(56km)四方を基準とした。シドニー港の景観画像例を図5に示す。景観データは、チャート、陸上マップや現地調査結果を基に作成した。ランドマークとなる山や建築物、更に海底地形については3次元でのモデリングを行っている。また、主要港では、着岸岸壁にフェンダーなどを作り込んだ。建設中の大型海上橋梁についても完成図を入手して景観データを作成し、レーダ映像用データも用意した。

6.2 海底地形

海底地形を表現する3次元データベースは、紙海図を基に座標と深度をデジタル化して構築した。なお、しゅんせつした港湾や防波堤・岸壁など人工的な構造物近傍は、海図から得られる深度情報のみでは不十分であり、現実的な海底地形のモデル化を行うためにも入念にチェックする必要があった。そこで、全海域の等深線図(Depth Contour Map)と主要航路及び港湾の断面図を作成して海底地形をチェックし、不自然な箇所に関しては、適切な補間点を加味しながら修正

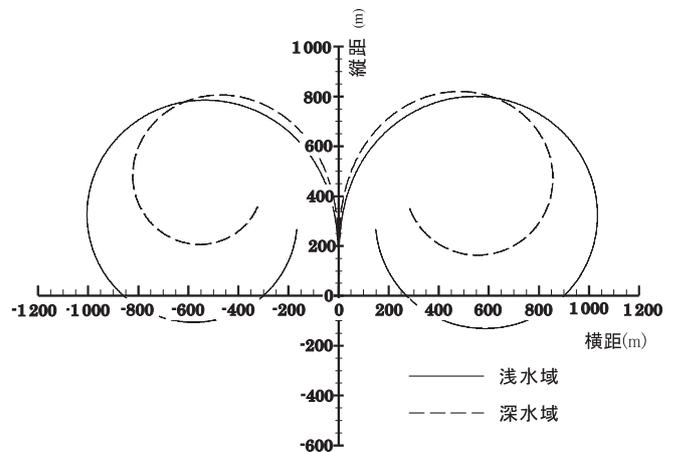


図4 旋回半径に対する浅水影響の計算結果
Simulation of Shallow Water Effect on Turning Circle

表2 訓練海域
Training Sea Areas

訓練海域名称	
Approach to Jakarta	ジャカルタ港への入港
Approach to Surabaya	スラバヤ港への入港
Straits of Dover	ドーバー海峡
Sydney	シドニー港
Singapore West and East	シンガポール西行き、東行き
Tokyo	東京港
Uraga	浦賀
Kanmon Kaikyo	関門海峡



図5 シドニー港の景観画面
View of Sydney Port

作業を行った。

6.3 航行援助施設(Navigational Aids)

ブイや灯台などの Navigational Aids 情報については、紙海図から読み取った設置位置データ(緯度, 経度), 灯質などの属性を灯台表⁶⁾などに基づいて景観データベースを作成した。しかし, 手作業による入力ミスやレーダで使用している航海用電子海図(Electronic Navigational Chart : ENC)との相違が生じた。このため, Navigational Aids 情報に関して, ENC に含まれているデータベースと景観用データベースの相違を自動チェックするプログラムを作成し, 全海域(約 3 000 個)についてチェック作業を行い, ENC 情報を正として修正した。

6. パイロットカード及びホイールハウスポスター

水先人(パイロット)訓練も考慮して, 船長から水先人へ船舶の載荷状態, 推進器・操船機器に関する情報などが書かれたパイロットカード及び旋回, 停止性能などをまとめて表記したホイールハウスポスターを各船種について用意した。

7. あとがき

小型船舶操縦士資格に関する社会的な要求にともない, 小型船舶操船シミュレータやヨットシミュレータを開発した(第1の波)。次いで海技士資格に必要とされるレーダ ARPA (Automatic Radar Plotting Aids)シミュレータの社会的な要請にともない, レーダ ARPA 視界再現装置⁷⁾や本格的な実船搭載型の操船シミュレータ⁸⁾を開発してきた(第2の波)。更に, 第3の波として大型船舶操船シミュレータを使った船員訓練を, 実際の乗船履歴の一部に代替え可能とする社会的な要求を予測していたが, 今回の開発は更に操船シミュレータと実機ディーゼルエンジンプラントを接続するという, おそらく世界初の試みとなった。

第3の波への対応はシステム規模が大きいため多大な労力を要したが, 無事引渡しまでこぎつけられたのは, 関係各位の多大なご協力のおかげである。ここに謝意を表する。

参 考 文 献

1) 運輸省海上技術安全局船員部監修: 英和对訳 1995 年

STCW 条約, (1996), 成山堂書店

- 2) 遠藤: 操船シミュレータ研究会の活動 - 海事社会への貢献と連帯 -, 日本航海学会シンポジウム, (2007)
- 3) 大津: IMO 標準海事通信用語集準拠 海事基礎英語 (2002), 海文堂出版
- 4) 平野: ほか: 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
- 5) Japan Captains' Association (JCA): THE BEST SEAMANSHIP A Guide to Ship Handling, p. 29
- 6) 例えば, 海上保安庁: マラッカ海峡水路紙, (1998-3)
- 7) 植木: ほか: 操船シミュレータの開発, 三井造船技報, 170(2000-6), p. 7
- 8) 上入佐: ほか: 次世代型オンボード操船シミュレータの開発, 三井造船技報, 185(2005-6), p. 45

〔問い合わせ先〕

機械・システム事業本部 機械工場 産業機械設計部
TEL 0863 - 23 - 2335 白井 潤二

株式会社三井造船昭島研究所 業務統括部
TEL 042 - 545 - 3111 上入佐 光



上入佐 光



五十嵐和之



青木 隆司



草ヶ谷誠一



岸本 隆



白井 潤二

高炉用軸流圧縮機の高濃度酸素富化への対応

石原修二* 小野修一郎** 田杭隆一** 沢井幸光**

A Study on Safety of Axial Compressor for Highly Oxygen-Enriched Blast Furnaces

Shuji ISHIHARA, Shuichiro ONO, Ryuichi TAGUI, Yukimitsu SAWAI

In ironworks, an oxygen-enriched air is blown into a blast furnace by an axial compressor to increase the production of pig iron. The oxygen enrichment by 5% (oxygen concentration : 26%) is already achieved by using the conventional axial compressor. Meanwhile, the furnace operation in much higher oxygen concentration is wanted for more production of pig iron. However, the risk for the burnout accident might become higher along with the increase of the oxygen concentration. For instance, the clearance between the moving blade and the casing of the axial compressor is so small that the incidence of spark might initiate the combustion under oxygen enriched air environment. Nevertheless, the phenomenon that might be generated at axial compressor components under the circumstances is not investigated in details.

The incidence of spark, the heating and the wear characteristics of steels being applied were investigated by the authors to clarify the effect of oxygen concentration using a sliding wear testing equipment. It has been found that the abrasible coating of Ni-BN cermet on the contact area of the components is useful for prevention of burnout under the highly oxygen-enriched air environment.

製鉄所では鉄鉄の生産量を増大させるため、酸素濃度を高めた酸素富化空気を軸流圧縮機を使用して高炉に送風している。従来仕様の圧縮機でも酸素富化率 5% (酸素濃度 26%) までの実績は有しているが、より高濃度の酸素富化への対応が強く望まれている。しかし、酸素濃度の上昇に伴って焼損事故の危険性が增大する。例えば、軸流圧縮機内部は、動翼先端とケーシングの隙間が非常に狭く、接触した場合には発生する火花は燃焼の 3 要素の一つである火源となり得る。ただし、実際の酸素富化環境下で発生する現象については不明な点が多い。

そこで、高濃度酸素富化状態で鋼材の接触摩耗試験を行い、酸素濃度と火花の発生状況、鋼材の摩耗及び発熱特性との関係を定性的に明らかにした。さらに、高濃度酸素富化に対する焼損事故防止対策として、接触の可能性のある部材表面に Ni-BN 系アブレイドブル溶射を施すことにより、安全性を確保できることを検証した。

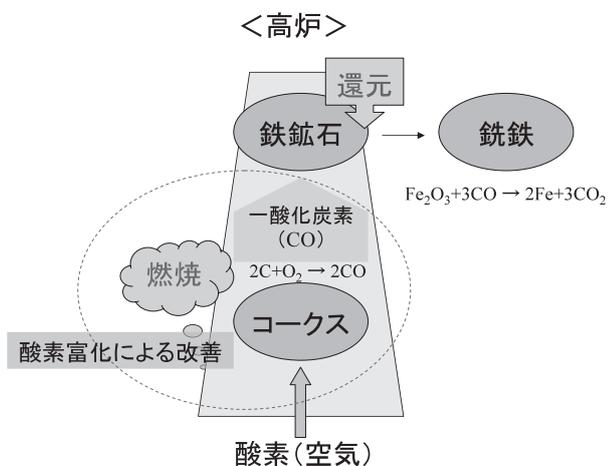


図 1 酸素富化高炉の概念
Oxygen-Enriched Blast Furnace

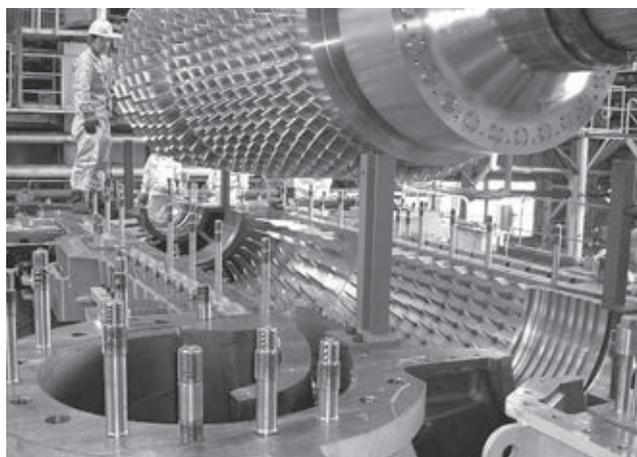


写真 1 軸流圧縮機の内部構造
Inner Structure of Axial Compressor

* 技術本部 玉野技術開発センター

** 機械・システム事業本部 機械工場 産業機械設計部

1. 緒言

高炉での鉄鉄生産量を増大させるため、製鉄所では酸素濃度を高めた空気を高炉に導いている。ここで用いる空気への酸素の混合を酸素富化と呼ぶ。酸素富化高炉の概念を図1に示す。従来、高炉に送風される空気は、高炉用圧縮機から吐出される空気に、酸素圧縮機から吐出される酸素を混入していた。この方法は、高圧酸素富化と呼ばれる。しかし、この場合、高炉用圧縮機の吐出圧力以上に、酸素圧縮機から吐出する酸素の圧力を上げる必要があり、エネルギー量の増大とともに、安全性にかかわるメンテナンスに大きな労力を必要としていた。この問題を解決するために、高炉用圧縮機の吸込み側の空気に酸素圧縮機で昇圧した酸素を供給し、酸素富化された空気を高炉用圧縮機で圧縮して吐出側から高炉に送風する方法が採られている。この方法は、低圧酸素富化と呼ばれる。ただし、この低圧酸素富化では、圧縮機内部に酸素濃度の高い空気が導かれることになる。

高炉用圧縮機には、大風量を効率的に送ることができる軸流圧縮機が広く用いられている。三井造船の軸流圧縮機は、酸素富化率 5% (酸素濃度 26%) までの使用に対しては実績を有しているものの、近年では更に高い酸素富化率への対応を求められている。

周知のとおり、酸素は可燃性ガスであり、空気中では不燃性のもので酸素中では可燃性となり得る。鋼の発火温度と酸素濃度との関連を調べた報告によると、酸素濃度の上昇に伴って発火温度は低下していくが、比例関係ではなく、酸素濃度が 60% で既に酸素濃度 100% 時の発火温度と同等である¹⁾。ゆえに、わずかな酸素濃度の上昇でも、鋼表面が受ける影響は大きいと考えられ、状況に適した対策を施すことが必要となる。

軸流圧縮機ではケーシング内の翼先端、軸シールラビリンスなど部材が非常に近接している。軸流圧縮機の内部構造を写真1に示す。酸素富化環境下において、不測の事態によってこれら部材が接触した場合、摩擦に伴う発熱及び摩耗粉の燃焼が、高濃度の酸素によって促進され、材料が連続的に高温にさらされ焼損してしまう可能性も考えられる。

そこで、本報では、高濃度酸素富化環境下で部材が接触した場合に起こる現象を明らかにするとともに、十分な安全性を確保するための対策について検討した結果を報告する。

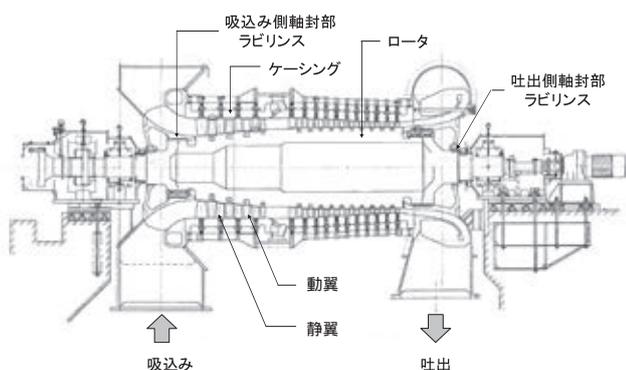


図2 軸流圧縮機の断面構造
Cross Section of Axial Compressor

2. 軸流圧縮機の構造

軸流圧縮機は、吸込み口側から吐出口側までガスが回転軸に平行に流れることで、大流量のガスを送ることができる。この特長を生かし、ガスタービンや高炉用の送風機として広く利用されている。軸流圧縮機の断面構造を図2に示す。ロータとそれを囲むケーシングに、それぞれ動翼と静翼が放射状に取り付けられている。

酸素富化空気が通過する圧縮機内部において、近接する部材の組み合わせとして、

- ・ロータと軸封部ラビリンスフィン
- ・動翼とケーシング
- ・ロータと静翼

が挙げられる。高濃度酸素富化環境下で、これらの部材が接触した場合に、酸素濃度が及ぼす材料への影響について試験を実施し、実機への適用性を評価した。

3. 高濃度酸素富化環境下での試験

3.1 接触に伴う材料の摩耗試験

3.1.1 試験装置

酸素富化環境下で回転体への接触を模擬するために、図3に示す試験装置を製作した。加熱した酸素富化空気をチャンバ内部に導くことによって、圧縮に伴う流体の昇温を模擬し、またチャンバ内で回転するロータ側面にピン状の試験片を押し付けることによって、運転中の接触摩耗を模擬した。試験部を含むチャンバ内部の構造を写真2に示す。なお、接触時の状況を監視できるように、接触部近傍に CCD カメラ用の観察窓を設けている。

3.1.2 試験方法

圧縮機内部で使用される材料のうち、接触する可能性のある部品を想定し、ロータ及びピン材質の組み合わせを決定した。なお、ピン型試験片の形状は、各材質とも直径 9 mm の丸棒で、先端を厚さ 4 mm のマイナスドライバ状に研削加工したものである。

試験条件を表1に示す。試験はロータを回転させながら加熱した酸素富化空気を導入して昇温し、チャンバ内が 200 に達した時点で、エアシリンダによりピン型試験片をロータ側面に接触させた。エアシリンダは 0.5 MPa の圧縮空気により駆動させ、接触開始後 1 mm の移動量で停止するよう設定した。CCD カメラにより、接触部の火花発生及び発熱の状況を観察した。

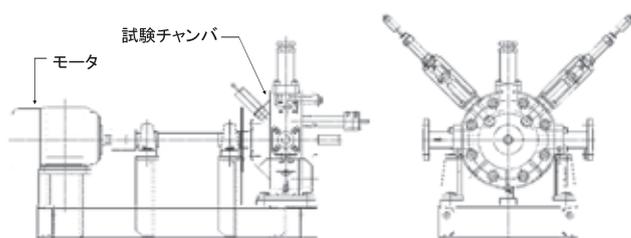


図3 接触摩耗試験装置
Sliding Wear Testing Equipment

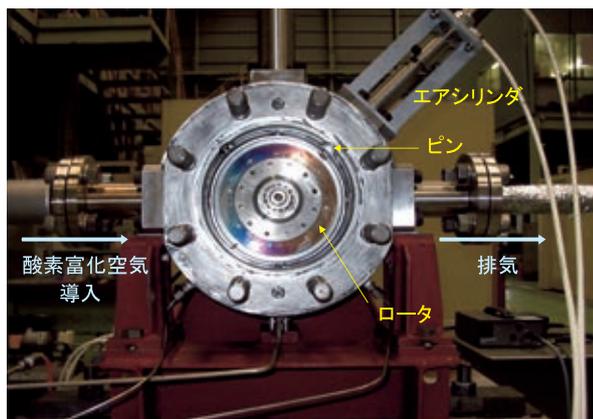


写真2 接触摩耗試験装置の内部
Interior of Sliding Wear Testing Equipment

表1 摩耗試験条件
Wear Testing Conditions

酸素富化率 ()内は酸素濃度	0%(21%), 9%(30%), 19%(40%)
試験温度	200 (チャンバ内温度)
ロータ回転数	1750 rpm
試験片材質 ロータ ピン	SNCM431 SS400, SUS403, SUS430, SUS630
エアシリンダ 駆動圧力 移動量	0.5 MPa 1 mm

3.1.3 試験結果

(1) 火花の発生状況

いずれの材質の組み合わせにおいても火花の発生を確認した。試験結果の一覧を表2に示す。鋼種別ではSS400の火花発生量が最も多く、SUS430が最も少なかった。一例として、写真3にSS400の酸素富化率0%及び19%での火花の発生状況を示す。酸素濃度の上昇とともに火花の発生量(明るさ)も増加していくが、特に、SS400及びSUS630については、酸素富化率19%における火花発生の状況が、酸素富化率0%(大気状態)と比較して明らかに激しくなっていた。

また、ピンの送り量はすべての試験において1mmに設定しているにもかかわらず、酸素富化率の上昇とともに、火花の発生時間が長くなる傾向であった。ただし、SUS430ではいずれも火花の発生時間に大差はなく、酸素富化率との関連はなかった。

(2) 発熱影響の検討

火花の発生時間は、表2に示すとおり、SUS430以外、酸素富化率19%の方が富化率9%より長くなっている。これは接触に伴う発熱が基材の熱膨張を大幅に助長したためと考えられる。一方、酸素富化率9%の場合は、富化率0%に比較して接触に伴う発熱の影響を受けているものの、火花の発生時間を考えると基材の熱膨張はそれほど大きくないと考えられる。

この酸素富化率と発熱の関係性を明らかにするため、各酸素富化率での試験後の組織観察を行った。写真4にSUS630の



A) 酸素富化率: 0%

B) 酸素富化率: 19%

写真3 酸素富化率の相違による火花発生状況の比較 (SS400)
Comparison of Incidence of Spark with Various Oxygen Concentrations (SS 00)

表2 酸素富化環境下における接触摩耗試験結果
Result of Sliding Wear Testing under Oxygen Enrichment

ロータ 材質	ピン 材質	酸素富化率(酸素濃度)					
		0%(21%)		9%(30%)		19%(40%)	
		火花 発生量	発生時間 (s)	火花 発生量	発生時間 (s)	火花 発生量	発生時間 (s)
SNCM431	SS400		5.7		4.7		12.4
	SUS430		2.6		2.4		1.5
	SUS403		2.9		6.2		15.0
	SUS630		6.1		6.1		15.1

: 酸素富化率0%時のSS400の火花発生量に相当
: を基準に多い
: を基準に少ない

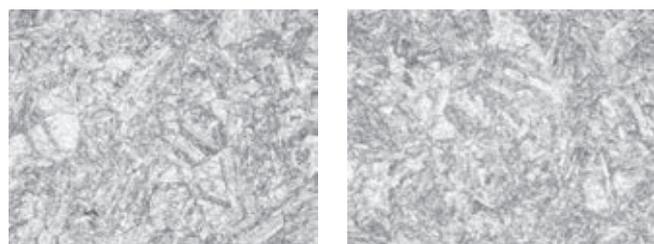
結果を一例として示す。これは、摩耗表面から内部に向かって100μmの位置におけるミクロ組織観察の結果を示す。酸素富化率0%では未試験材と同様の組織を呈しているが、酸素富化率の上昇とともに変化がみられ、酸素富化率19%では完全に塑性流動している。これは、発生する熱量の増大とともに、発熱の影響が広範囲に拡大したことを示している。すなわち、酸素富化率が大きくなるほど摩耗粉の燃焼が促進されるため、接触部での発熱量は増大し、この発熱により基材は熱膨張する。あわせて摩耗に伴う塑性変形による発熱も加わるため、摩耗量も大きくなる。その結果、摩耗が加速的に進行するものと考えられる。すなわち、酸素富化率9%と19%の間で、基材自体の発熱量が変化したと推定される。

なお、いずれの場合も酸素富化率19%までの本試験条件下では、摩耗量の加速的な増加はみられたものの、摩擦発熱による連鎖的な基材の焼損は認められなかった。また、ロータについてはピン材の融着物の付着は認められたが、ロータ自身の損傷はなかった。

3.2 酸素富化に伴う燃焼防止対策の検証試験

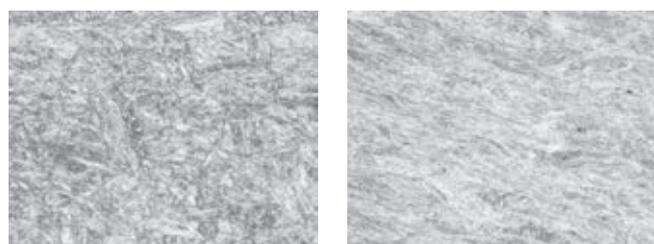
3.2.1 コーティング材料の選定

3.1に示したとおり、高濃度酸素富化環境下では、大気環境下と材料摩耗特性が異なることから、異常時にも安全性が確保できる有効な対策を検討し、その検証試験を行った。高濃度酸素富化環境下で問題となるのは、鋼材の接触に伴う摩耗粉の燃焼及び基材の発熱である。これらを回避するためには、鋼材同士が直接接触しないようにすることである。その



A) 未試験材

B) 酸素富化率 0%



C) 酸素富化率 9%

D) 酸素富化率 19%

写真 各酸素富化率における接触部近傍のミクロ組織 (SUS630)
Microstructures near Contact Area with Various Intensities
of Oxygen Enrichment (SUS630)

手段として、鋼材表面への皮膜緩衝層の形成を検討する。

純酸素を扱う酸素圧縮機でも同様の課題を抱えており、接触に伴う火花の発生を抑制するために銀をコーティングしている事例がある²⁾。しかし、大型の軸流圧縮機に対して貴金属を用いた皮膜形成は、コスト面から現実的ではない。そこで、同等の性能を有し、更にコスト面で優れるコーティング材として、表3に示す候補材を選定した。これらの材料は、燃焼性の摩耗粉を生じないことや、接触した際の摩擦を低減させることを目的として当社ガスタービンに使用しているアブレイダブル溶射材や、セラミックス系のペイント材より選定した。

3.2.2 試験方法

表3で選定したコーティングを、3.1.2で用いたものと同じピン型試験片の先端に施工した。試験片の基材はSUS403である。溶射の膜厚は0.5mm、ペイントの膜厚は約0.1mmとした。なお、溶射については、NiCr溶射をボンド層として基材表面に0.1mm施工した後に、アブレイダブル皮膜の溶射を行った。いずれも大気下で施工した。試験中の酸素富化率は19%とし、その他は表1と同じ条件で、3.1.2に示した方法により接触摩耗試験を行った。

3.2.3 試験結果

各皮膜を形成した試験片を用いて接触摩耗試験を行った結果を表に示す。このうちペイントによりセラミックス系皮膜を形成した試験片では、ピン先端の接触と同時に火花の発生が確認された。これは接触に伴う衝撃により、ち密な皮膜全体がはく離してしまつたためと推定される。一方、アブレイダブル溶射皮膜を形成した試験片では、火花の発生が確認されるまでに0.5mmの膜厚に対して3~5秒を要した。このことから、接触による火花を防止するためには、ち密な皮膜よりも、比較的脆く徐々に摩耗していく特性を備えたアブ

表3 試験に供したコーティング材の一覧
List of Coating Materials Tested

コーティング材		化学成分 (wt%)						
		Ni	Cr	Al	Fe	BN	C	ポリエステル
アブレイダブル 溶射	Ni-BN系	Bal	14	3.5	8	5.5	-	-
	Ni-C系	Bal	-	-	-	-	15~40	-
	SiAl系	-	-	シリコンアルミ60	-	-	-	40
ペイント	BN系	主成分：窒化ホウ素、非晶質シリカ						
	酸化物系	主成分：アルミノケイ酸ナトリウム						

表 コーティング試験片の接触摩耗試験結果
Sliding Wear Test Result of Coated Specimens

コーティング材		膜厚 (mm)	火花抑制効果
アブレイダブル 溶射	Ni-BN系	0.5	有り
	Ni-C系	0.5	無し
	SiAl系	0.5	有り
ペイント	BN系	約0.1	無し
	酸化物系	約0.1	無し

レイダブル溶射皮膜が有望であると考えられる。

Ni-BN系アブレイダブル溶射皮膜の有無による試験後の試験片外観の差異を写真5に示す。ピンの送り量が同じ1mmに対して、両者の摩耗量の差は約2mmとなっている。これは、前者では溶射皮膜の緩衝による発熱低減作用によって、試験片基材の熱膨張が抑制されたためと推定される。

本結果より、Ni-BN系アブレイダブル溶射皮膜により火花発生を抑制できることが分かった。Ni-BN系アブレイダブル溶射皮膜の主成分はNiであるが、純酸素雰囲気下で火種による金属の引火性を調べた報告では、NiはFe系材料よりも明らかに優れた結果を示している³⁾。よって、Ni-BN系アブレイダブル溶射皮膜の摩耗粉においても、耐燃焼性に優れた成分が主であることから、高濃度酸素富化環境下での使用も問題ないものと考えられる。一方、同時に試験したSiAl系アブレイダブル溶射皮膜については、火花抑制効果は良好であったが、樹脂成分が40%含まれており、摩耗粉の耐燃焼性の点ではNi-BN系アブレイダブル溶射皮膜に劣っている。

実機への適用性評価

1 高濃度酸素富化環境における耐久性検証

これまでの評価より、接触時の摩耗及び発熱を抑制するうえで、Ni-BN系アブレイダブル溶射が有効であることを明らかにした。ただし、実機で使用するためには、高濃度酸素富化環境下での皮膜の耐久性を検証しておく必要があり、暴露試験を行った。

基材はラビリンス部パッキンリングに使用されるSS400とし、試験片(30mm x 20mm x 10mm)上面に、ボンド層として0.1mmのNiCr溶射をした後、膜厚0.5mmでNi-BN系アブレイダブル溶射を施工した。また、暴露条件は、酸素富化率を19%とし、温度は300及び400にてそれぞれ100時間保持した。

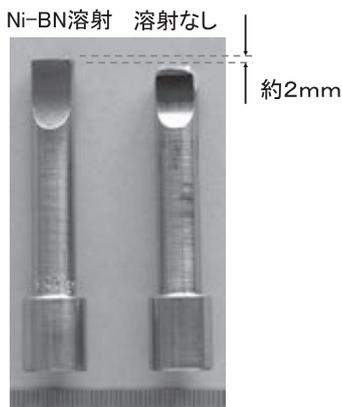


写真5 コーティングの有無による摩耗量の比較
Comparison of Wear of Specimen between Coated and Uncoated Conditions

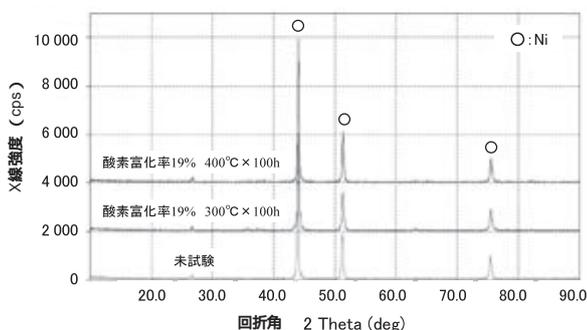


図 酸素富化率 19% 空气中 100 時間暴露における
Ni-BN 系皮膜の XRD 分析結果
XRD Chart of Ni-BN Cermet Coat after 100hr- Exposure under Air
of Oxygen-Enriched by 1 %

2 アブレイダブル溶射皮膜の変質

試験の結果、暴露後の溶射皮膜には外観的な変化は認められなかった。また、皮膜を構成する成分の変質の有無を確認するために、X線回折(X-ray Diffraction: XRD)による分析を行った。X線回折チャートを図に示す。主成分であるNiのピークのみ明瞭に検出されたことから、大きな変質はないものと考えられる。

3 基材界面への影響

Ni-BN系アブレイダブル溶射皮膜は多孔質であるため、高濃度の酸素富化環境下では、溶射皮膜に侵入した高濃度の酸素が基材表面に到達し、酸化スケールの生成促進によって、はく離が生じる可能性がある。そこで、高濃度酸素富化環境下に暴露後の試験片を切断し、皮膜界面の状況を観察した。結果を写真6に示す。基材表面のスケール生成等はみられなかった。

5. 結言

軸流圧縮機構成材料の高濃度酸素富化環境下における接触摩耗試験を行い、回転部材接触時の発火・発熱を抑制する表面コーティングを選定・評価した。得られた知見は以下のとおりである。

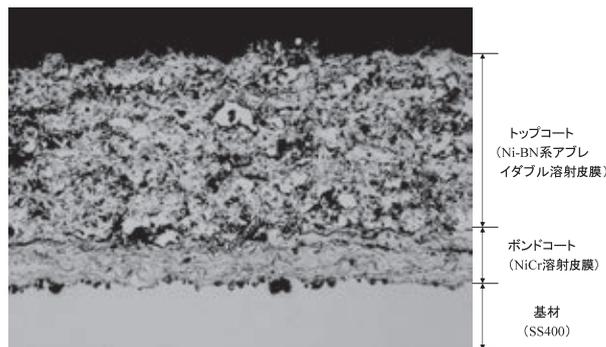


写真6 高濃度酸素富化環境暴露後の溶射皮膜断面
Microstructure of Thermal Spray Coating after High Exposure Test

酸素富化率の上昇とともに、鋼材の接触摩耗に伴う摩耗粉は容易に燃焼するようになる(摩耗粉の全量が可燃物となり得る)。

酸素富化率の上昇とともに、接触摩耗時の発熱が大きくなる。そのため、鋼材の熱膨張によって摩耗量は増大し、摩耗粉の発生量も多くなる。

Ni-BN系アブレイダブル溶射を鋼材表面に施工することにより、接触に伴う火花の発生や発熱及びそれに伴う摩耗を抑制することができる。

Ni-BN系アブレイダブル溶射は、高濃度酸素富化環境下においても、皮膜及び基材界面ともに変質はみられない。

以上のことから、Ni-BN系アブレイダブル溶射皮膜は、高濃度酸素富化の高炉用軸流圧縮機の回転物との接触部に最適であり、より高い安全性が確保できるものと考えられる。

参 考 文 献

- 1) 駒宮：過剰酸素中の燃焼危険性と安全対策，産業安全研究所安全資料，RIIS-SD-72-1(1973)
- 2) 園家：ほか：ギヤ内蔵型酸素圧縮機への銀コーティング法の適用，石川島播磨技報，46，2(2006)，p. 65
- 3) J.M.Stoltzfus, et al.: ASTM Committee G-4 Metals Flammability Test Program: Data and discussion, (1988)

〔問い合わせ先〕

技術本部 玉野技術開発センター
TEL 0863 - 23 - 3061 石原 修二



石原 修二 小野修一郎 田杭 隆一 沢井 幸光

作業観測法を適用した労働安全評価手法の開発

篠田 岳 思* 田 中 太 氏* 藤 原 和 俊** 佐々木 昭**
 志 水 栄 一** 内 村 俊 昭** 三 宅 真 一** 中 井 孝 之**
 岡 田 実** 尾 崎 昭 生** 太 田 巧**

Development of Methodology of Risk Assessment for Occupational Safety in Using Work Observation Technique

Takeshi SHINODA, Takashi TANAKA, Kazutoshi FUJIWARA, Akira SASAKI, Ei-ichi SHIMIZU, Toshiaki UCHIMURA, Shin-ichi MIYAKE, Takayuki NAKAI, Minoru OKADA, Akio OZAKI, Takumi OHTA

It is an important issue to prevent an occupational accident in every industrial activity. The aim of this research is to improve the safety against workplace hazards at shipyards by a risk assessment. The authors have developed the methodology of risk assessment as an effective and useful assessment process by creating a database for past occupational accidents at shipyards and grasping quantitatively the unsafe work and work environmental condition in every work at actual shipyard in order to establish effective countermeasures with the developed methodology of hazard-countermeasure deployment.

The system concept of observation tool for work and its safety using PDA(Personal Digital Assistant) aims the improvement of safety at work field and feedback to production design and planning fields. This system is composed by major four stages such as the stage of work and safety observation and record, the stage of adding up of observed record, the stage of analysis of relationship between recorded data and the stage of evaluation of work and safety.

あらゆる産業活動において労働災害の防止は重要課題である。本研究では造船所での作業事故を未然に防ぐために、リスクアセスメントによる安全改善を目的としており、労働災害のデータベースの構築をはじめとして、作業や作業環境の潜在的危害の把握と作業における定量的な不安全状態の把握、安全改善の対策の立案方法について検討を行った。不安全状態の把握のために開発を行った小型携帯情報端末による作業・安全観測システムは、作業・安全観測及び記録、観測記録・集計、作業・安全解析、作業・安全評価のステージから成り、作業・安全観測により得られたデータを基にして不安全状態の定量化を行い、問題点の改善として生産設計・計画にフィードバックを行うことを目的としている。

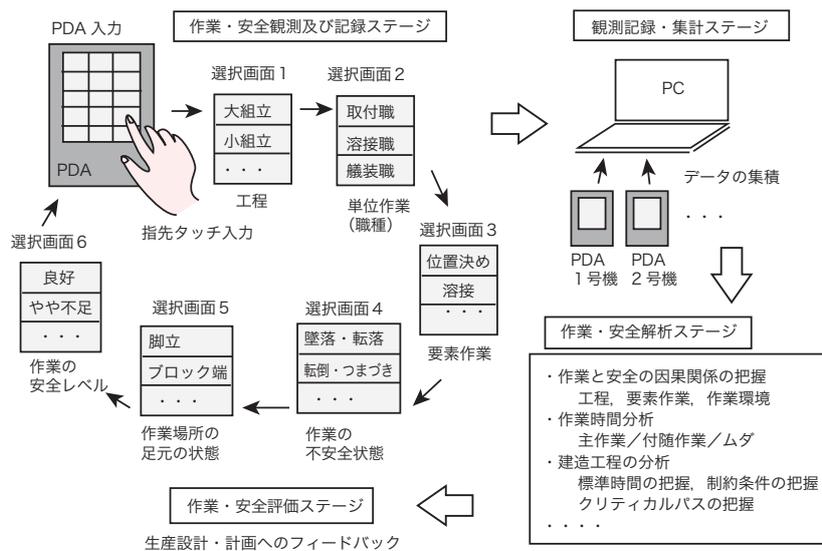


図1 PDAを用いた作業・安全観測のシステムコンセプト
 A System Concept of PDA Observation Tool for Work and its Safety

* 九州大学大学院 工学研究院

** 船舶・艦艇事業本部 玉野艦船工場 艦船建造部

1. 緒言

近年、日本における造船工場では建造量の増加に伴い、**図2**に示すように労働災害の発生件数は上昇傾向にあり、また、災害の発生頻度を表す災害度数率は、他産業と比較しても依然として高い状況にある。更に、報道などにおいても造船所での重大災害が取り上げられることも度々起こっており、生産性と安全性を両立させた効果の高い作業安全改善は、社会要請として求められている課題である。今後の産業の維持・継承・発展には、造船を初めとする産業界の有する技能伝承の課題とともに、労働安全への改善に向けた努力は重要課題であると考えらる。

本研究はリスクアセスメントによる安全改善を目的として、造船所の事故を未然に防ぐため、労働災害のデータベースの構築を初めとして、**図1**に示した方法により、作業や作業環境の潜在的危険の把握と作業における定量的な不安全状態の把握、安全改善の対策の立案方法について検討を行った。

2. 作業・安全観測を用いたリスクアセスメント法

日本造船工業会が各造船所からの労働災害報告を基にして、毎年取りまとめている「休業災害(含死亡)調査報告」²⁾によると労働災害の発生要因には、人的要因に起因するものが数多く報告されているが、被災当事者の不注意行動や作業手順の誤り、労働環境の不整備などへの指摘に留まっていることが多い。また、一般的には労働災害発生は、被災者個人の特殊な事例として扱われることが多く、災害は、希な発生事象と扱われることが多い。

造船所では、作業時には一人作業になることも多く、作業者がどのような作業において、どのような不安全行動を行い、これがどの程度の頻度で現れるのかは未だに不明な点が多く、造船所においてリスクアセスメントを適用する場合の課題である。

また、近年ではリスクアセスメントを導入している企業も

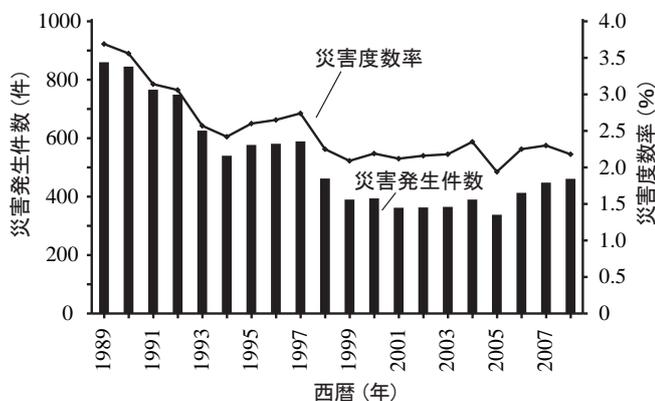


図2 日本の造船所における労働災害発生件数と災害度数率 (全国造船安全衛生対策推進本部のデータ¹⁾に基づき作成) Number and Frequency Rate of Occupational Accidents in Japanese Shipbuilders Sector

多いが、一般に行われているリスクアセスメント活動では、リスクに関する「起こりやすさ」や「危害の度合い」などは、感覚的尺度による評価が主であることが多い。

このため、本研究では、作業に潜む不安全の定量化を目的として、生産工学(Industrial Engineering: IE)における作業観測法の適用から、作業者の作業及び作業の不安全状態を同時にサンプリングして記録する小型携帯情報端末(Personal Digital Assistant: PDA)を用いた作業・安全観測ツールを開発し、実際に工場の作業現場において、このツールを用いて作業の安全観測を行い、不安全状態の定量化を試みた。

2.1 リスクアセスメントの流れ

造船所における労働安全向上のためのリスクアセスメントの方法について、作業者自らが作業の安全改善に取り組めるように工夫を行い、**図3**に示す過程により構成を行った。以下に各過程について説明する。

過程1) 潜在的危険の同定

作業に潜む人的・物的な損失を引き起こす潜在的な危険であるハザードを同定する過程である。ハザードの同定方法には、過去に発生した労働災害事例を参考にすることや、ヒヤリハット、安全パトロールでの違反切符の集計、現場の作業観測などが考えられる。ここでは、三井造船において過去に発生した労働災害報告をデータベースにより電子データ化を行った。

過程2) 作業中のハザードのリスク解析

定められたハザードについて、どの程度の損失と頻度の災害が起こりうるかを検討するリスク解析の過程である。ここでは、PDAを用いて作業に潜む危険の頻度を集計し定量化を行う。作業・安全観測の項目を定型化・簡単化し、また操作性の工夫を行った。

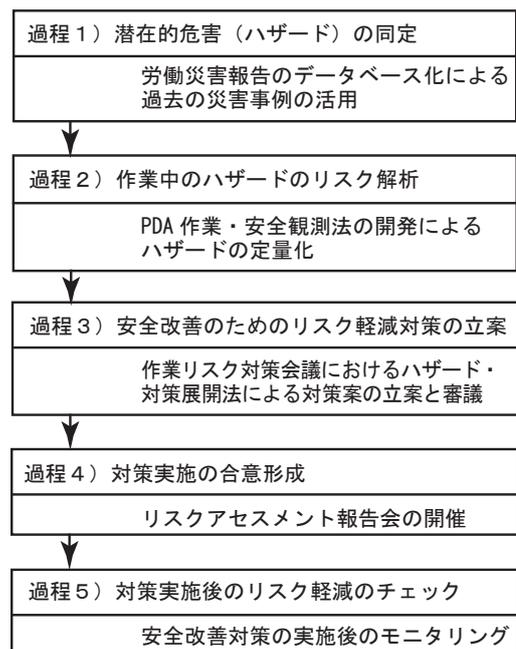


図3 労働安全のためのリスクアセスメントの流れ Flow of Risk Assessment for Improvement of Occupational Safety

過程3)安全改善のためのリスク軽減対策の立案

作業に潜むハザードを軽減化するための安全改善の対策の検討を行う過程である。ここでは、リスクアセスメントの実行者が作業リスク対策会議を開催して、各ハザードへの対策の立案を容易にするために、ハザード・対策展開法の適用を行った。

過程4)対策実施の合意形成

リスクアセスメント報告会などの開催を行い、リスクアセスメントの実行者や造船工場管理者の間での合意形成を行った。

過程5)対策実施後のリスク軽減のチェック

安全改善のための対策の実施後に、検討したハザードについて許容可能なリスク以下になり、維持できているかをモニタリングにより確認する過程である。

以上を主に**過程4)**までについて、玉野艦船工場での適用を通して問題点を検討しながら研究を進めた。

なお、適用に際して造船所への導入を想定したリスクアセスメント手順書を整備して、リスクアセスメントの際の観測対象の選定から作業・安全観測方法、安全改善のための対策の検討までの流れをできるだけ体系的に整理した。

2.2 IE を適用した作業・安全観測法

IE は生産性を高める方法として、国内の造船工場においても各種の適用が行われてきた方法である。IE とは所定の品質水準を保ちながら、生産に投入される「人、材料、設備、エネルギー」のムダを少なくするための解決方法であり、生産性の向上やコストダウンのための改善案を見出すための方法である。また、現状の生産状況を定量的に把握するために作業観測法が用いられている。

本研究では、作業に潜むリスクを定量的に把握するために、作業観測に作業と不安全状態を同時に観測する作業・安全観測法について考案を行い、現場の作業者にとって実施しやすい方法として提案を行う。この方法を作業者が実施することにより、作業者が相互に作業を観測し合い、作業安全について理解を深め合う安全向上の効果を期待している。

2.2.1 IE における作業観測法

作業観測法は大きく分けると連続観測法と瞬間観測法がある³⁾。

連続観測法は、作業者の行動を随時追跡して観測して行く方法である。この観測法の長所としては、実時間を計測するため、作業要素の割合を漏れなく推定できるが、短所としては、作業者一人に観測者一人が担当して作業の実時間を計測するため、作業観測が長時間に渡り、また分析処理のための労力を必要とする。

一方、瞬間観測法では、観測項目を予め用意して、ランダムな時間に、ある作業者の行動を瞬間的に観測・記録し、作業項目ごとの頻度を集計して、観測された作業について割合から不安全な作業割合の分析を行う方法である。この観測法の長所としては、一人で複数人を観測することが可能であり、短時間で精度に応じた作業要素の割合を推定できる。短所としては、必要な観測項目を予め用意するために、作業に精通している必要がある。

また、瞬間的な観測を積み重ねるため、観測結果が確率論に依存するため説得性が難しい場合があることや、観測により得られたデータが膨大となりデータ処理が問題となることがある。特に、作業時間が短い作業について信頼性を上げると、**付録**に述べるようにデータ数が膨大となる。

本研究では、瞬間観測法により作業・安全観測法の検討を進めた。

なお、作業・安全観測法では観測されたデータを集計して分析するが、一般には観測数が膨大となり集計作業に多くの手間がかかる。そこで、本研究では小型携帯情報端末 PDA を用いた作業・安全観測法について検討を行った。

2.2.2 作業観測のための作業の区分と名称

製品の部品から完成品に至る組立工程の作業は、組立過程のレベルに応じて、生産活動、工程、単位作業、要素作業、動作の5段階のレベルに区分される。これを**表1**に示す。なお、ここには建造レベルでの区分も例として併記している。

ここで、単位作業とは、工程の下位の作業区分レベルである一人の担当作業者により区分できる作業を指す。例えば、建造では、担当者ごとに分けられる配材作業、仮付け作業、溶接作業などがこれに相当する。

また、要素作業とは、単位作業の下位の作業区分レベルであり各担当者が作業を行う際に構成する作業を指す。例えば、担当する作業が溶接作業であれば、道具揃えに関連する溶接準備作業、加工に伴う溶接主作業、スラグ落しのような付随作業のように担当者の作業がシーケンスとして区分できる作業に相当する。

更に、動作とは、要素作業の下位の作業区分レベルであり作業の最も細かいレベルである。例えば、溶接作業では、保護具の装着、リード線、チップのセットなどのような動作として展開される。

作業・安全観測では、作業の区分レベルに応じて観測の着目度は異なるが、ここでは、作業全体を把握するため、作業レベルを要素作業に設定して作業・安全観測を行うこととした。

2.2.3 観測に際しての必要項目の検討

作業観測に際して観測項目は、現場での各種の項目や項目間の関連を知りたいというニーズから多岐にわたり、項目数が膨れあがることが多い。一般に要素作業を多く取れば作業観測内容の精度を上げられるが、反面、観測数が増大するため適度なバランスを必要とする。このため、作業・安全観測の準備として、事前に観測に必要最小限の項目の検討のために連続観測を行い、不安全状態が懸念される作業要素を考慮して整理を行うことが考えられる。

本研究では、PDA を用いた作業・安全観測に必要な要素

表1 IE における作業レベルの定義
Definition of Work Level on Industrial Engineering

レベル	作業レベル	建造レベル(例)
1	生産活動	船舶建造
2	工程	切断加工, 部品製作, 大組, 搭載等
3	単位作業	配材作業, 取付作業, 溶接作業等
4	要素作業	溶接準備作業, 溶接主作業, 溶接付随作業等
5	動作	保護具装着, チップのセット等

表2 PDA を用いた作業・安全観測のための入力項目
(NC 切断機オペレータの場合)
Input Items into PDA Observation Tool for Work and its Safety
(Example of NC Cutting Machine Operator)

入力項目	選択項目
観測日時	・自動入力
観測者氏名	・登録者名より選択
工程	・NC 切断
作業担当	・NC オペレータ
要素作業	<ul style="list-style-type: none"> ・NC 操作 ・書き入れ ・グラインダ ・残材切断 ・NC データ確認 ・指差確認 ・清掃 ・コンベア上移動 ・コンベア操作 ・機器準備 ・ノロ・手切断 ・機器監視 ・運搬補助 ・休憩・手待ち ・移動
不安全状態	<ul style="list-style-type: none"> ・墜落・転落 ・転倒・つまづき ・機器接触 ・火傷 ・保護具未使用 ・ローラーチェーン巻込まれ
作業場所の足下の状態	<ul style="list-style-type: none"> ・鋼板上 ・定盤上 ・定盤端部 ・コンベア上 ・安全通路 ・階段
安全レベル	<ul style="list-style-type: none"> ・良好 ・やや不足 ・不足 ・ルール違反 ・災害直結

として、表2にNC(Numerical Control)切断工程での例を示すが、観測項目には、観測日時、観測者の氏名、観測している工程名、工程内の単位作業としての担当作業、担当作業の要素作業、観測した際の不安全状態、作業環境を示す事項として作業場所の足元の状態、更には、これらを観測した際の作業者の安全レベルを入力することとした。

なお、観測時の日時は、観測の入力ごとに秒単位まで自動的に入力される。

また、観測入力装置としてPDAにはHewlett-Packard社製のiPAQ212を用いた。なお、画面寸法は4インチ(83mm×62mm)の制約があるため、この画面での見やすさを考慮し、しかも簡易な入力を図るために、写真1のようにスイッチパネルをタッチして入力する方法としてデザインした。また、一つの観測項目に対して、最大15の入力項目に絞り込み、プログラムの検討を進めた。

3. PDA を用いた作業・安全観測の実施

3.1 作業・安全項目の設定

玉野艦船工場では切断工程は、2008年2月に深井地区に移転が行われ、深井地区切断工場として新設された⁴⁾。工場にはNC切断機5台等が配備されている。この新工場でのPDAを用いた作業・安全観測を行った取組事例について紹介する。工場の工程は水切りからNC切断、アイトレーサ切断、トレーラによる各組立ステージへの搬出に至る12工程に分かれており、約50名の作業者が配属されている。



(a)PDA の入力画面例



(b)PDA の観測状況

写真1 PDA を用いた作業・安全観測ツール
PDA Observation Tool for Work and its Safety

また、作業担当者は作業指揮者、作業者、クレーンオペレータ、NCなどの機器オペレータ、運搬者、トラック運転手に分かれており、各担当の作業を単位作業とした。更に、各作業の担当者の主作業、付随作業、準備作業から要素作業として、クレーン作業や確認作業、移動や手待ち・休憩を含む63項目を定めた。

また、これらの要素作業に懸念される不安全状態として、厚生労働省方式の21種類の事故の型分類¹⁾を参考にし、墜落・転落、転倒・つまづき、人払い、荷振れ、合図の不徹底などの22項目の不安全状態を定め、その各要素作業の際の足元の状態について6項目の入力項目を定めた。更に、これらに対する観測者の主観に基づく安全性の評価として、「良好」、「やや不足」、「不足」の安全レベルに加え、工場において規定されている安全規定に違反する場合の「違反」、災害に直結する事象として発見された場合の「災害直結」の5種類の安全レベルを定め、観測者自身の主観的印象として入力することとしている。

なお、作業・安全観測中に、安全上の不十分な作業や行動を発見した際には、作業者に注意を促すこととしている。

3.2 作業・安全観測の観測結果

3.1により定めた作業・安全観測項目を基にしてPDAにプログラムを入力し、作業安全観測を実施した。

作業・安全観測の現場導入に際して、観測に多くの時間を必要とする場合には作業時数について心配がある。このため、作業入力時間及び観測件数について見積りを行った。

図にPDAに作業・安全観測の結果を入力するのに要する時間の頻度分布を示す。この図によると1件当たりの入力時間は概ね30秒程度であり、また、入力時間の80%は1分半程度で入力が行われていたことが分かった。

また、図5にはNC切断工程における各要素作業の観測数による作業割合の変化を示す。この図によると、要素作業の入力状況に応じて作業割合が一定の値に収束して行く様子が示されているため、この工程において必要な観測データ件数

作業観測法を適用した労働安全評価手法の開発

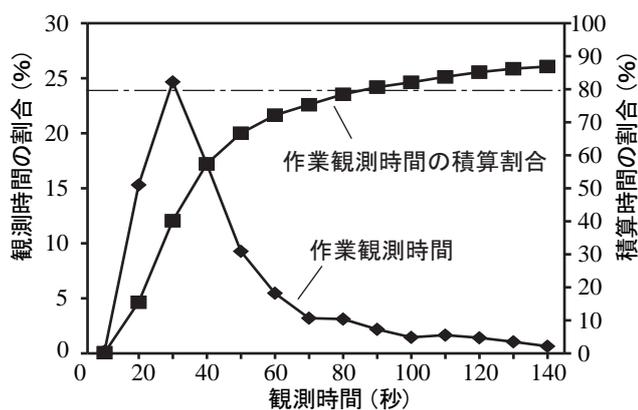


図 4 PDA を用いた作業・安全観測時の所用時間
Duration of Activities for PDA Observation

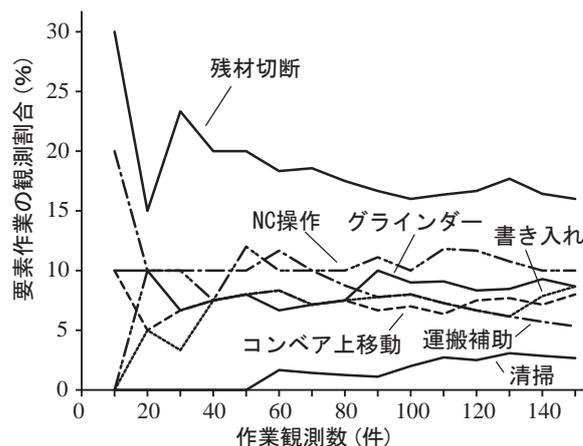


図 5 NC 切断工程での観測数による要素作業割合の変化
Change of Share of Work Element according to the Number of PDA Observation at NC Cutting

表 3 NC 切断工程での PDA を用いた作業・安全観測による集計結果
Result of PDA Observation Work and its Safety at NC Cutting

工程	要素作業	ルール違反	災害直結	不足・やや不足	不安全発見件数(合計)	不安全発見率	観測件数	災害の型分類						
								転倒	激突され		挟まれ 巻き込まれ	飛来落下	高温接触	その他
								転倒 つまづき	荷振れ 合図無し 人払い等	機器 接触等	手足払い ・立ち位置	吊荷 不安定等	火傷	保護具 不使用
工程 5 NC 切断	NC 操作	2			2	5%	44							2
	グラインダー	3		17	20	38%	52	2		6				12
	コンベア上移動		5	16	21	43%	49	19		2				
	ノロ・手切断		1		1	5%	21			1				
	機器監視	2			2	7%	27							2
	機器準備	1			1	6%	18							1
	残材切断	3		26	29	33%	87	6		11			9	3
書き入れ		1		1	2%	44			1					
工程 9 運搬	ハッカー吊荷移動	1		31	32	55%	58	3	25		1	3		
	マグチャック吊荷移動		1	30	31	54%	57	1	26		3	1		
	マグポータ吊荷移動			30	30	52%	58	1	22		6	1		
	残材積込	1		19	20	41%	49		10		9	1		

は、100 件～120 件程度であることが分かった。

以上の検討より、1 工程当たり 150 分～180 分程度あれば、作業の概要が把握できることが分かった。

表 3 には、要素作業と不安全状態の発見状況を集計した結果の一部を示す。安全レベルには、現状の造船所の作業ではやむを得ない、あるいは現状では仕方がない状況であったとしても、不安全状態が発見された場合には「良好」と入力せず、安全改善への問題を顕在化して誰の目にも理解できる状態にする、いわゆる「見える化」を推進するために、積極的に不安全状態の入力に努力するように取り決めた。このため、不安全状態の発見率の絶対値の大きさを判断するのではなく、他の項目に比較して相対的に大きな値を取る項目について注意を払うこととした。

表 3 によると、例えば、NC 切断工程では要素作業によっては、鋼板移動のコンベア上に垂直に 15 cm 間隔で取り付けられたスラット上の歩行を伴うことや、稼働している NC 機器を背にした作業を伴う特徴がある。要素作業としてコンベア上の移動では、不安全状態の発見率が 43% あり歩行に伴う転倒つまづきに心配があることを示している。また、グラインダー作業では不安全状態の発見率が 38% あり、主な不安全要因は機器接触への心配があることを示している。更に、残材切断では不安全状態の発見率が 33% あり、主な不安全要因には作業に伴う転倒・つまづきや機器接触への心配があることが分かった。

また、切断された鋼材の搬出工程(運搬)は、要素作業全体において不安全状態の発見率が比較的高く、主な不安全要

因として転倒・つまづきや、クレーン作業に伴う合図、手足払いなどへの心配があった。

これらの作業・安全観測の集計結果を基にして、作業リスク対策会議を開催し安全改善策の検討を行った。

作業・安全観測を基にした安全改善の検討

1 安全改善対象の選定

PDA を用いた作業・安全観測法による観測データの集計分析を基にして、作業リスク対策会議を開催し安全改善への検討を進めた。今回の適用検討では熱心に入力がなされ、観測総数が2593件あった。検討では、初めに安全レベルに心配のある「災害直結」及び「ルール違反」について1件でも入力があった要素作業については、観測者より入力時の状況について説明を受け、意見交換を行い、安全改善策として検討して行くかを決定した。次に「不安全状態の発見率」を基にして安全改善のための作業項目を決めるが、今回は観測総数が多いこともあり、「不安全件数」が20件以上ある要素作業について検討を行うこととした。

なお、安全改善の検討には、ここではハザード・対策展開法を提案し対策の検討を進めた。これらについては .2 で述べる。

2 ハザード・対策展開法

多くの造船所での安全対策の現状では、「指導・教育する」や「徹底する」といった作業者の安全意識に頼った対策が多くみられ、実効性に不安があることがある。また、安全対策会議では、一般的には人によって安全への考え方が異なるため、議論が拡散し有効な対策案として結実することが難しいことがある。

ここでは、会議を円滑に進め、有効な対策案を検討して行くための方法として、ハザード・対策展開法を提案する。この方法は、事故分析として従来より提案されているSHELモデルと4M4Eモデルを参考にして⁵⁾、潜在的危害要因を五つのハザード要因として、人間・作業従事者、保護機器、管理体制、作業機器、作業環境に展開し、それぞれのハザード要因について、現状を記載すると共に、教育的対策、工学的対策、確実な実施への対策の三つの視点からなるマトリック

表 ハザード・対策展開法による対策案の立案
Preparation of Countermeasure Planning by Methodology of Hazard-countermeasure Deployment

		ハザード				
		人間	危険回避・防護		危険源	
対策案の立案 ハザード対象：コンベア上の歩行移動 危惧項目：つまづき・転倒の恐れ		人間・作業従事者 (Man) 身体状況、健康状況、心身・精神状況、技量、知識、コミュニケーション	リスク回避・ハード (Hardware) 防護具、防護施設	管理 (Management) 組織、管理規定、工程計画、教育・訓練方法、手順書、マニュアル、チェックリスト、表示	作業機器類 (Machine) 設備、機械、器具、機能、配置、強度、品質	作業環境 (Environment) 施設、設備、歩行路環境、足下状況、労働時間、勤務時間、工程余裕
現状	現状 (Event)	・スラット上でクレーン操作を行う。 ・スラット上での歩行方法に問題がある。 ・靴底がスラットのバリに噛み、つまづき転倒する恐れがある。				スラットの歯の間隔が歩行には150mmと切断材にとっては都合良いが、中途半端であり、スラットへのつまづきや甲プロの引っ掛かりによるつまづき・転倒に心配がある。
	教育的対策 (Education)	知識教育 意識教育 実技教育 危険体験センター	歩行方法を確認する。 定期的な安全靴の交換が必要である。			
	工学的対策 (Engineering)	安全改善 作業環境改善 表示・警報 多重化 仕様変更 工程変更・削除 フェールセーフ		スラットの適正間隔を人間工学的見地から検討する。		スラットの形状を検討する。 (例)レール型のスラットにする。
対策	確実に実施するための対策 (Enforcement)	規定化 手順の設定 注意喚起 事例の表示 模範の表示	相互忠告による注意喚起を行う。	人間工学的に検討した内容を作業者に周知する。		スラットの交換基準を策定する。

スを作成し、このマトリックス内に対策として考えられる事項を展開して検討を行う方法である。

表に、つまづき・転倒が危惧されるNC切断工程での要素作業であるコンベア上の移動について検討した例を示す。

初めに、対策会議ではコンベア上の歩行移動の現状について意見交換を行った。例えば現状では次の指摘が成された。

安全靴と足の甲に装着する甲プロテクターとの間がスラットに引っ掛かり、つまづきの原因になること

古い安全靴を履き続けていると靴底がスラットのバリ(トーチに炙られ生成された尖りのある不整形)に引掛り易いこと

スラット幅は歩きやすさにより設定されたというよりも、切断した部材が起き上がりNCのトーチに引掛り避けることや、幅が狭すぎる場合にはコンベアの重量が増し、コンベア動力への負荷を避けることから設定されていることが推測されること

スラット交換については文書化された基準が無いこと

これらを、現状を示すマトリックスの行に展開した。

続いて表の縦の列について、具体的な対策として展開して行く。例えば、人間・作業従事者の項目には、教育的対策として定期的な安全靴の交換の必要性や、確実に実施するための対策として、相互忠告による注意喚起を記載した。また、危険源である作業環境の管理については、工学的な対策として、バリがひどいスラットを定期的に交換することや、人間工学的な見地からの適正幅の検討が対策として挙げられ、確実に実施する方法としては、スラットの交換基準の策定、人間工学的な分析をした内容の作業への周知が対策として挙げられた。

この様に、対策を検討して行く際にマトリックスのマス目を埋めるため、対策の立案に有効性があることや、実際に対策が実施されたかどうかについては、マス目に埋めた対策の消し込みで確認できる等の利便性があることが分かった。

なお、NC切断工程での安全改善案の中のスラット形状の適正間隔についての人間工学的な検討については、九州大学において実験的に検討を進めている。

5. 結言

PDAを用いた作業・安全観測ツールの開発を行い、このツールを用いたリスクアセスメント法について提案を行った。また、本手法を玉野艦船工場に適用を行い、現場での運用性を高めるための改善を検討した。

なお、本研究は三井造船と九州大学との組織対応型連携事業の一環として2007年7月より実施され、三井造船玉野事業所艦船工場の安全グループ及び技術本部と九州大学が連携して研究の取組を行っているものであり、この成果の一部を報告した。

参考文献

- 1) 全国造船安全衛生対策推進本部：統計資料，<http://>

www.zensenan.jp/toukei/index.html，(2010-9-2)

2) 日本造船工業会：休業災害(含死亡)調査報告

3) 平野：新作業研究，(2001)，p. 121，日刊工業新聞社

4) 三井造船：玉野事業所造船用鋼板の加工工場 深井切断工場完成・本格稼働，プレスリリース，<http://www.mes.co.jp/press/2008/20080821.html>，(2008-8-21)

5) 篠田：ほか：仮設工学，(2008)，p. 113，技報堂出版

付録 瞬間観測法の原理

瞬間観測法は、ある作業を発見したか、あるいは未発見であるか、の二項分布が基になっており、観測数が増加すると中心極限定理により正規分布になる。この性質を利用して信頼区間を設定し、信頼度に応じてサンプル数を決定する³⁾。

$$SP = \sqrt{\frac{P(1-P)}{N}} \dots\dots\dots(A1)$$

ここに、Pは観測項目(要素作業)の発生確率、Sは精度、Nは観測回数である。また、は信頼度により定める係数であり、信頼度を95%とした場合には2.0をとる。

観測回数は、例えば35%発生する要素作業の精度Sを±10%にて求める場合には、745回の観測数を必要とし、また5%発生する要素作業の精度を±10%にて求める場合には、7600回として得られる。

〔問い合わせ先〕

技術本部 技術総括部

TEL 03 - 5202 - 3600 小野 幹訓



篠田 岳思



田中 太氏



藤原 和俊



佐々木 昭



志水 栄一



内村 俊昭



三宅 真一



中井 孝之



岡田 実



尾崎 昭生



太田 巧

デジタル符号方式レーダの開発

土井 恭二* 木村 憲明** 弓井 孝佳*

Development of Radar Using Digital Coded Signal

Kyouji DOI, Noriaki KIMURA, Takayoshi YUMII

Recently, the demand for nondestructive testing of structures has risen. The scope of its coverage is expanding from civil engineering field to architectural engineering field. Therefore, the demand for specification of radar system has also been increased and diversified. For analog technology radar, it was necessary to change the design whenever the specification was changed, and a lot of time was required to develop new radar system. The newly developed radar is applicable to various changes in specifications only by changing digital codes. So it is possible to shorten the time required to develop new radar system. In this report, the outline of the digital code used for the radar and the output of the experimental system are described.

近年 構造物の非破壊検査に対する要求が高まっている。その対象も従来の土木分野から建築分野へと広がりつつある。この適用分野の拡大に伴い、レーダに要求される仕様も多岐にわたってきている。現在のアナログ方式を用いたレーダにおいては、仕様が変更されるたびに設計を変更する必要があり、開発に多くの時間を要していた。今回開発したデジタル符号方式レーダは、擬似ランダム雑音の相関を用いて物標からの反射信号を検出する方式を採用している。本方式では使用する符号を変更するのみで各種の仕様に対応することができ、開発に要する時間を大幅に短縮できる。

本報では、デジタル符号レーダに用いられる符号の概要及び試作したシステムによる実験結果について報告する。

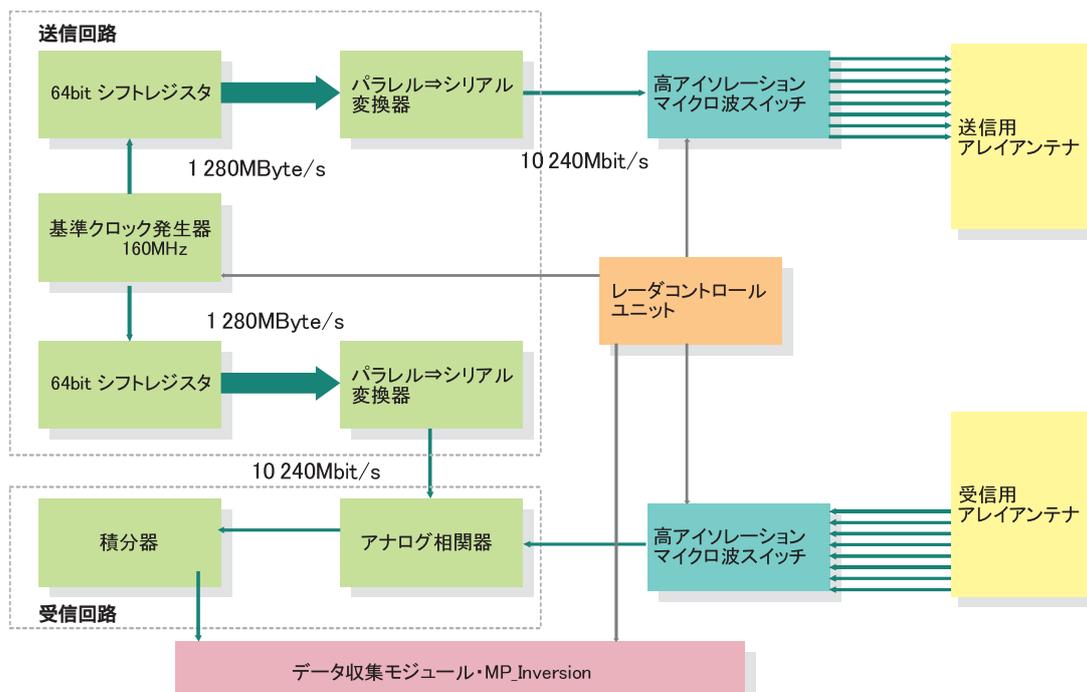


図1 デジタル符号方式レーダの構成
Outline of Radar using Digital Code

* 技術本部 玉野技術開発センター

** 技術本部

1. まえがき

1.1 レーダの高分解能化の現状

地中レーダによく用いられる方式には、パルスレーダと周波数変調連続波(Frequency Modulated Continuous Wave : FMCW)レーダの2種類がある。前者は時間の次元を前面に押し出した方式、後者は周波数の次元を前面に押し出した方式で、その実現方法は大きく異なるが、式(1)に表されるフーリエ変換を用いることにより、両者は表裏一体の関係にある。

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt$$

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega)e^{j\omega t} d\omega \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 j は虚数単位を表す。

この両者はそれぞれ一長一短を有しているが、三井造船製のレーダ¹⁾はすべてFMCW方式のため、以降FMCWレーダに話を限定する。レーダの分解能を上げる(すなわち、より小さなターゲットを検出する)ためにはパルスの時間幅を短くする必要がある。例えば、パルス幅が1 nsだとすると、土中においては比誘電率を9とすると10 cmの幅のパルスとなるため、それ以上距離の離れたターゲットの識別が可能となる。パルスの時間幅を短くするという事は式(1)より、周波数の帯域幅を広げると同じこととなる。周波数の下限はゼロのため、周波数帯域を広げるには、より高い周波数の電磁波を使用することが必要となる。したがって、レーダの高分解能化には、低周波から高周波までをカバーする広い帯域を有する回路が必須である。

FMCWレーダで周波数帯域を広げるためには、使用している素子のすべてが広帯域な特性を有する必要がある。しかし、素子によっては、電磁波の波長を利用して動作させるものもあり、このような素子では、その原理から広帯域化が不可能となる。この制約により、現状ではレーダの周波数帯域幅としては50 MHz ~ 4.5 GHz程度が限界であり、現在の技術では大幅な向上は望めない。

1.2 符号化方式による広帯域化

情報通信分野においては、情報の伝達容量を増やすために、その速度を上げることが重要な課題となっており、現在様々な機関において速度向上のための研究が進められている²⁾。この分野における情報はデジタル信号、すなわち“1”、“0”(言い方を変えれば“ON”、“OFF”)で表される。これらのデジタル情報を高速に伝えるには、デジタル信号のパルス幅を短くして、単位時間当たりの信号の数を増やすことが一つの方法となる。この伝送量はbps(bit per second)と呼ばれる単位で表される。現在では10 Gbpsを超える信号発生用の集積回路(Integrated Circuit : IC)が市販されており、更に高速のICも開発中で、近い将来伝送量は数十 Gbpsとなることが予想される。

1ビット(bit)はその定義より“1”、“0”の最小単位となるので、2ビットでアナログの1波長に対応する。このこ

とから10Gbpsの符号を使用すると、最高周波数5 GHzのFMCWレーダに相当する分解能が得られるものと期待される。更により高速のICを使用することにより、アナログ方式では実現の困難な超高分解能型のレーダも実現可能となる。符号はフィールドプログラマブルゲートアレイ(Field-Programmable Gate Array : FPGA)を用いて発生させることにより、その長さを自由に延ばすことができる。すなわち、高分解能型(FMCWレーダにおける高周波型)から低分解能大深度型(低周波型)まで同じ回路を用いることができるため、回路の汎用性が高まるといった利点も生じる。

2. 符号理論の概要³⁾

2.1 PN符号の定義と性質

PNはPseudorandom Noiseの頭文字をとったもので、擬似ランダムノイズと訳する。PN符号の発生は確定的でランダム性はない。しかし、ランダム性を確かめる統計上の検定には合格するため、擬似ランダムと呼ばれる。PN符号は以下に示すランダム性の性質を満足する。

平衡性

系列の各1周期内で“1”の出現する回数と“0”の出現する回数は、たかだか1しか変わらない。

連なり性

1周期に含まれる“1”の連なりと“0”の連なりのうち、それぞれの連なりの半分は長さが「1」で1/2²は「2」、1/2³は「3」・・・すなわち連なり数「k」のものは1/2^kの割合で存在する。ただし、この規則は分類していった場合に連なり数が意味ある場合のみ成立する。

相関性

系列を巡回させ、あらゆる状態で各項ごとに比較を行った場合、一致する項の数と一致しない項の数は、たかだか1しか変わらない。

以上示したランダム性の他に、以下の性質が要求される。

周期性

この要求はランダム性と矛盾することになるが、工学的な応用の上からは、無限周期の完全なランダム性は必要なく、繰返し周期を長くした上で統計的なランダム性を満足すればよい(擬似ランダム)ため不都合は生じない。

直交性

発生符号の種類が多数であること

この性質を用いることにより、複数のレーダに異なる符号を割り当てることができ、またそれらを同時に使用しても混信を防ぐことが可能となる。

以上の性質を有するPN符号には複数の種類が存在するが、今回開発したレーダにおいては、それらの中でM系列(Maximum Length Sequence; 最大周期系列)と呼ばれる符号を使用した。以降、M系列に絞って話を進めることとする。

2.2 PN符号の生成

式(2)に示す符号があると仮定する。

$$c_1 = \{ a_{n-1}, a_{n-2}, \dots, a_2, a_1, a_0 \} \dots\dots\dots(2)$$

この符号を巡回置換した以下の場合も符号となる，このような性質を有する符号を巡回符号と呼ぶ．

$$c_2 = \{ a_{n-2}, a_{n-3}, \dots, a_1, a_0, a_{n-1} \} \dots\dots\dots (3)$$

.....

$$c_n = \{ a_0, a_{n-1}, \dots, a_3, a_2, a_1 \} \dots\dots\dots (4)$$

これらの符号は，その各元を係数として式(5)のように多項式として表すことができる．

$$c(x) = a_{n-1}x^{n-1} + a_{n-2}x^{n-2} + \dots + a_1x + a_0 \dots (5)$$

$f(x)$ を $g(x)$ で割った余りを $R_{g(x)}[f(x)]$ と表すと， $c(x)$ を 1 回巡回置換した符号は，式(6)となる．

$$xc(x) = \{ a_{n-1}x^{n-1} + a_{n-2}x^{n-2} + \dots + a_1x + a_0 \} \dots\dots (6)$$

したがって，

$$R_{x^n-1}[xc(x)] = a_{n-2}x^{n-1} + \dots + a_1x^2 + a_0x + a_{n-1} \dots (7)$$

となり，巡回符号となる．

ここで，多項式 $g(x)$ を巡回符号を表す m 次の最小モニック多項式(最高次の係数が 1 の多項式)とすると，これを i 回巡回置換した $a_i x^i g(x)$ も符号となり，更にこれらを加算したのも符号となる．よって $(n - m - 1)$ 次がそれ以下の次数の多項式を $d(x)$ と表すと，符号 $c(x)$ は，

$$c(x) = d(x)g(x) \dots\dots\dots (8)$$

と表される．ここで， $g(x)$ はモニック多項式であるので x^{n-m} を乗ずると n 次の多項式となることから 式(9)と表わされる．

$$x^{n-m}g(x) = (x^n - 1) + r(x) \dots\dots\dots (9)$$

ここで $f(x)$ は符号を巡回置換したものを $(x^n - 1)$ で割った余りであるので符号となることから 式(8)より $f(x)$ は $g(x)$ を因数として持つことになる．したがって，式(9)は，

$$x^n - 1 = g(x)f(x) \dots\dots\dots (10)$$

と表される．

また， $f(x) = d(x)g(x)$ とおくと，

$$f(x) = d(x)g(x) = d(x)g(x)g(x) = d(x)(x^n - 1) = d(x)x^n - d(x) \dots\dots\dots (11)$$

となる．式(11)において $d(x)x^n$ は n 次以上の項を持つ多項式で， $d(x)$ は $(k - 1)$ 次以下の項を持つ多項式であるので， $f(x) = \sum_i f_i x_i$ と表すと，係数 f_i は $k \leq i \leq n - 1$ でゼロにな

らなければならない．すなわち，式(12)となる．

$$f_i = \sum_{j=0}^k h_j a_{i-j} = 0 \quad k \leq i \leq n - 1 \dots\dots\dots (12)$$

ところで， $f(x)$ はモニック多項式であるので，最高次の次数は 1，つまり $h_k = 1$ となる．よって式(12)は，

$$a_{i-k} = \sum_{j=0}^{k-1} h_j a_{i-j} \pmod{2} \quad k \leq i \leq n - 1 \dots\dots\dots (13)$$

となり，符号全体を求めることができる．

以上述べた PN 符号の生成手順を取りまとめて以下に示す．

k 次の原始多項式 $h(x)$ を求める．

原始多項式の係数から次の線形回帰方程式を構成する．

$$a_i = \sum_{j=1}^k h_j a_{i-j} \pmod{2} \quad i = k, k+1, k+2, \dots \dots (14)$$

k 個の任意の初期値 $(a_0, a_1, a_2, \dots, a_{k-1})$ を与えて式(14)より残りの $(a_k, a_{k+1}, a_{k+2}, \dots, a_{n-1})$ を計算する．

2.3 PN 符号の相関

2.2 で記した手順により発生された符号は，回路を通りアンテナからコンクリート等の内部に向かって放射される．なお，符号は信号へと変換されて送信される．送信された符号(正確に言えば信号となるが，特に区別が必要な場合を除いて符号で統一する)はコンクリート中の物標により反射され，ある時間遅れをもって受信される．受信された符号は送信された符号との相関をとることにより，物標の有無及びその距離(遅れ時間から算出可能)が判定される．

今，次の 2 種類の符号があるとする．

$$\{a_i\} = (a_0, a_1, a_2, \dots, a_{n-1}) \quad a_i = 0, 1$$

$$\{b_i\} = (b_0, b_1, b_2, \dots, b_{n-1}) \quad b_i = 0, 1 \dots\dots\dots (15)$$

このとき，この二つの符号列の相互相関関数を式(16)のように定義する．

$$R_{ab}(l) = \frac{N_A - N_D}{N_A + N_D} \quad |l| \leq n - 1 \dots\dots\dots (16)$$

N_A ; a_i と b_{i+l} の一致する数

N_D ; a_i と b_{i+l} の不一致の数

ここで， $\{a_i\}$ と $\{b_i\}$ が同じ符号列の場合，式(16)は自己相関関数となる．PN 符号の相関性から符号列を巡回させた場合， $N_A - N_D$ は -1 になる．したがって，PN 符号の自己相関関数は式(17)のようになる．

$$R_{PN}(l) = 1 \quad l = 0 \pmod{n}$$

$$R_{PN}(l) = -\frac{1}{n} \quad l \neq 0 \pmod{n} \dots\dots\dots (17)$$

PN 符号の次数を十分大きくした場合 $1/n \approx 0$ となることから符号が完全に一致したときのみ出力が現れる．PN 符号は巡

回符号であるので、1ビットずつずらしていけば、あるタイミングで二つの符号は完全に一致し、相関出力が得られる。

実際のレーダにおいては、回路の構成上{0,1}の符号を用いる代わりに{-1,1}の信号(波形)を用いる。ただし、信号の大きさは規格化している。この場合の相関関数を式(18)に、自己相関関数を式(19)及び図2に示す。

$$R_{ab}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T a(t)b(t-\tau) dt \dots\dots\dots (18)$$

$$R_{PN}(\tau) = 1 \quad \tau = 0$$

$$R_{PN}(\tau) = 1 - \left(\frac{n+1}{n}\right) \left| \frac{\tau}{T} \right| \quad -T \leq \tau \leq T$$

$$R_{PN}(\tau) = -\frac{1}{n} (l-1)T + \tau \leq -T \leq T - \tau \dots (19)$$

ここで、 T は信号の周期、 l は任意の整数、 Δ はPN波形のパルス時間幅を表す。

これらの結果から、{-1,1}の信号を用いても{0,1}の符号を用いた場合と同様の相関出力が得られる。

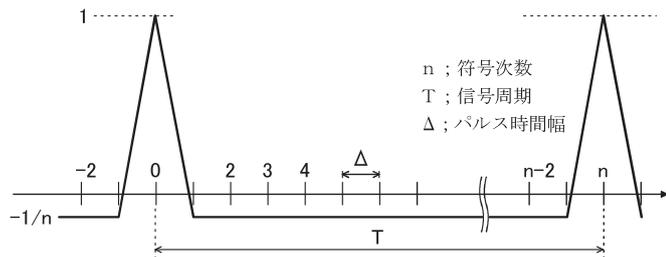


図2 PN符号の自己相関関数
Autocorrelation Function of PN Code

復調の手順をまとめると以下のとおりである。

アンテナから符号列を放射する。符号列は物標にて反射されると、その距離に応じた時間遅れをもって受信され、相関器へと送り込まれる。

相関器では送信アンテナから最初の符号が送信された時間をゼロとして、参照用の符号と受信された符号の相関をとる。

符号長 n にわたって両者の相関をとり終わると、参照用の符号を1ビットずらせて、再度受信された符号との相関をとる。この動作を符号列が一巡するまで繰り返す。したがって、分解能は式(19)における τ となる。

相関出力をモニタに表示する。受信された符号と参照符号が一致した時間、すなわち相関出力が得られた時の参照符号のずれ時間が物標までの距離に相当する。

3. 装置試作及び動作試験

3.1 装置構成

今回、動作確認の目的で試作したデジタル符号方式マルチパスリニアアレイレーダ装置のブロック図を図3に示す。図中の破線で囲った部分が符号の発生器となる。また、写真1に試作機の概観を示す。試作した装置においては、符号長2047、原始多項式の次元11、1ビットのパルス時間幅0.1nsのM系列符号を採用した。符号生成に使用したFPGAは、ALTERA社製、Cyclone EP2K5Q208C7 208pin PQFPで、その主要諸元を表1に示す。このFPGAから出力される16チャンネルの並列信号をシリアライズ(その主要諸元を表2に示す。)を用いて1チャンネルの直列信号に変換することにより10Gbpsの符号列とした。なお、符号発生器は、信号用と参照信号用に同じ物を二組用意し、同期をとって動作させている。この目的は、参照信号のずれ時間により距離を計

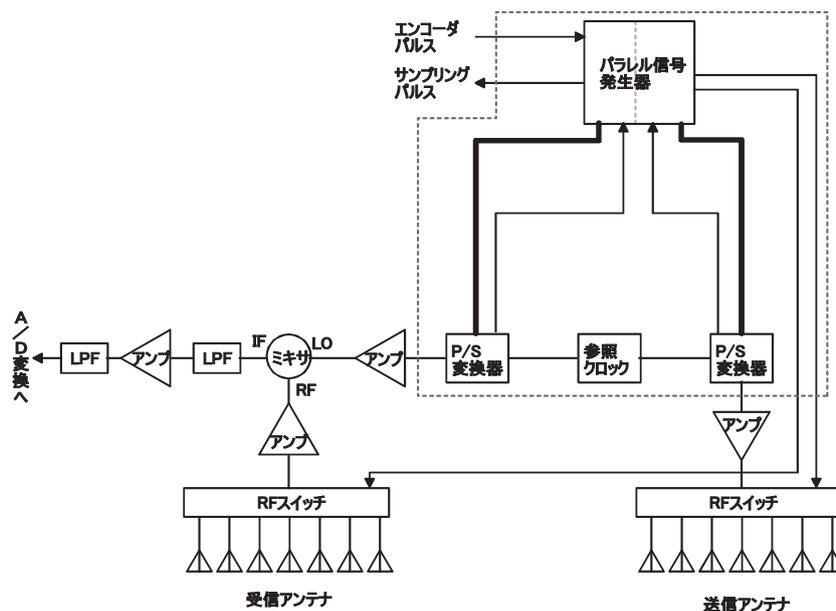


図3 レーダブロック図
Block Chart of Radar



写真1 レーダ概観
Overview of Radar

表1 FPGA 主要諸元
The Main Parameters of FPGA

プロセス	90 nm, 9 レイヤ, メタル, low-k (低誘電率)誘電体プロセス 300 mm ウェハ上に構築
最大出力レート	600 Mbps
出力チャンネル数	16 ch(LVDS)
メモリ	119 808 bit

表2 シリアルライザ主要諸元
The Main Parameters of Serialiser

プロセス	SiGe バイポーラ
出力レート	10 Gbps
入力チャンネル数	16 ch(LVDS)
出力チャンネル数	1 ch(CML)
出力(RL = 50)	400 mVp-p + 5 dBm
消費電力	1.15 W

測するためである .

3.2 試験結果

まず, 符号発生回路において生成された符号を直接相関回路に入力し, 参照信号との相関をとった場合に得られた出力を図5に示す. 図より明らかなように, パルス幅約 0.2 ns(半値幅)の信号が得られており, 期待されたとおりの出力となっている.

次に, 符号発生回路及び相関回路を, 帯域幅として 50 MHz ~ 4.5 GHz を有するボウタイアンテナに接続して送受信し, 受信信号を増幅器にて増幅した後, 参照信号と相関をとった結果を図5に示す. なお, 図5において信号の極性が逆転しているのは, 受信アンプにより信号の極性が反転したことによる. この場合, 送受信されるのは, 試験で用いた {0, 1} で表される符号ではなく, { - 1, 1 } で表される信号となっている. 図5と比較してアンテナの帯域幅の制限等

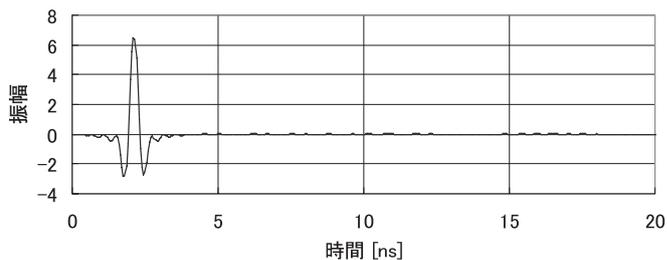


図4 相関回路出力
Output of Correlation Circuit

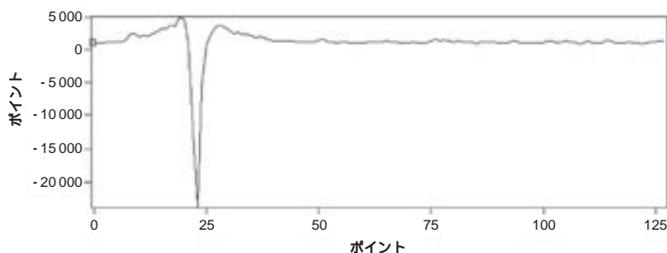


図5 レーダ出力(Aモード)
Output of Radar(A-mode)

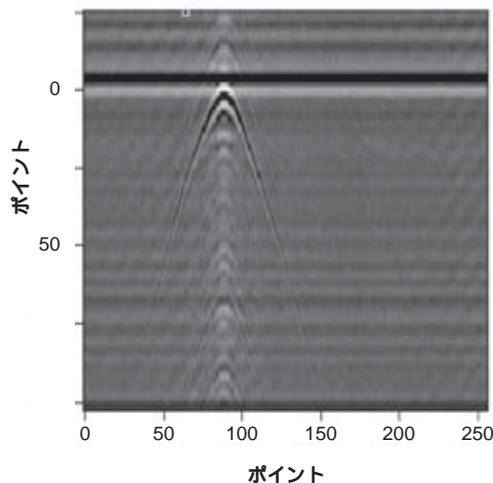


図6 レーダ出力(Bモード)
Output of Radar(B-mode)

により, 多少鈍った波形となっているが, レーダとして使用するには十分な波形が得られている. 図5中の単位はポイント数を表しているため, 出力された数値に物理的な意味はない. ここに示した出力は, 時間 - 振幅波形(Aモード)を示している. これがレーダの基本データとなる. このデータをレーダの進行方向に関して1次元的に収集し, 濃淡表示したものが断面表示(Bモード)になる. 図6にBモードの一

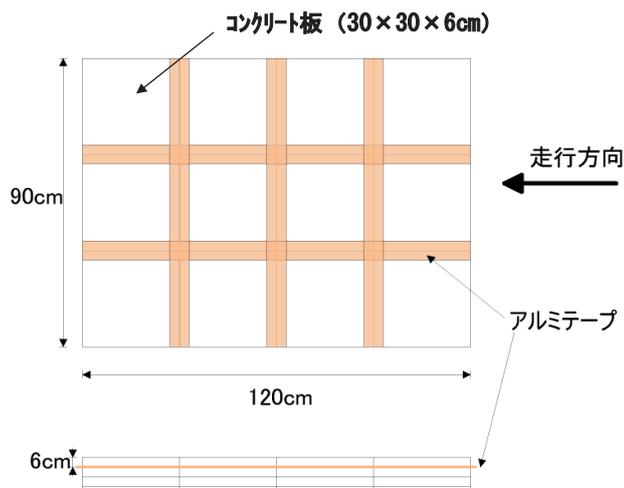


図7 テストピース
Test Pieces

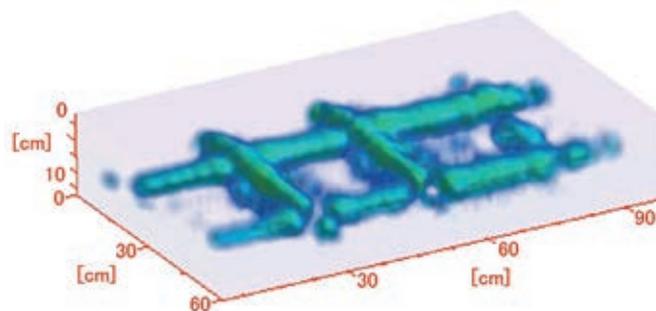


図8 レーダ出力(3次元モード)
Output of Radar(3D-mode)

例を示す。図6における放物線状の映像が物標からの反射信号を表している。また、マルチパスリニアアレイレーダにおいては、基本データを二次元的に収集することにより、3次元映像を作ることができる。図7に鉄筋コンクリートを模擬したテストピース(30 cm × 30 cm × 6 cmのコンクリート製歩道板を積み上げて構成)を示す。このテストピースを試作レーダを用いて計測し、その結果得られた3次元画像出力を図8に示す。この両者を比較すると、鉄筋の状態が3次元的に映像化されていることが分かる。したがって、本方式はマルチパスリニアアレイレーダとしても適用できることが確認できた。

あとがき

PN符号を用いたスペクトル拡散型レーダの開発に成功した。本方式を用いたレーダは、低周波帯を用いた大深度型から高周波帯を用いた高分解能型まで、FPGAに書き込むプログラムを変更するだけで、同じ回路を用いて実現可能といった拡張性に富んだ特長を有する。さらに、情報通信分野の技術の進歩によって、より高分解能のシステムにも発展できる可能性がある。現状で従来のFMCW方式に比べてほぼ同等

の出力が得られているが、今後ICの高速化が更に進めば、符号の相関が一層良くなるため、性能が向上することが期待できる。この点の改良を進めて将来的には当社の標準レーダへと発展させていく予定である。

参考文献

- 1) 木村．ほか:コンクリート床版検査用3次元映像化レーダの開発, 三井造船技報, 174(2001), p. 38
- 2) Ian Oppermann, et al.: UWB Theory and Applications, p. 39, Wiley
- 3) 横山: スペクトル拡散通信システム, p. 175, 科学技術出版社

〔問い合わせ先〕

技術本部 玉野技術開発センター
TEL 0863 - 23 - 3021 土井 恭二



土井 恭二 木村 憲明 弓井 孝佳

蛍光寿命フローサイトメータを用いた 創薬アッセイに向けた生細胞内 FRET の高精度評価

山口卓二* 林 弘能* 伊藤彰英** 中田成幸**

High Accurate Evaluation of Live Cell FRET Assay for Drug Discovery with Fluorescence Lifetime Flowcytometer

Takuji YAMAGUCHI, Hironori HAYASHI, Akihide ITOH, Shigeyuki NAKADA

In recent years, research and development have been made earnestly on “molecularly-targeted drug” which targets the specific proteins causing disease and is more focus-specific, more efficient and of less side-effect potential.

For screening compounds, it is preferable that each effect of the compounds is evaluated by detecting the response of a targeted protein in live cell with higher specificity than in-vitro assay, so live cell FRET assays have been developed and got a lot of attention.

FRET is a mechanism describing energy transfer between two chromophores. Already established method by fluorescence intensity ratio has some difficulties in evaluation because of fluorescent molecule concentration fluctuation in live cells. Mitsui Engineering & Shipbuilding Co., Ltd. has developed fluorescence lifetime flow cytometer to evaluate the FRET efficiency with more accuracy by eliminating the effect of fluorescent molecule concentration.

This time, FRET probes composed of MEK protein and ERK protein to detect the association and dissociation were expressed in live cells, and we confirm that MEK inhibitor concentration dependent dose response curve with fluorescence lifetime can be detected with more accuracy than with fluorescence intensity ratio, so this assay is thought to be useful for screening the anti-tumor drug in the drug discovery field.

近年、疾病の原因となる標的タンパク質に特異的に反応し、効果が高く、副作用の少ない分子標的薬の開発に対する期待が高まっている。この開発においては、実際の生体に近い生きた細胞の中で、標的タンパク質に対する薬剤候補の作用を直接計測することが望ましく、蛍光共鳴エネルギー移動(FRET)現象を利用した手法が研究され、注目を集めてきた。従来のFRET評価は、2種の蛍光分子間のエネルギー移動に伴う蛍光強度変化の検出により行われてきたが、蛍光分子の濃度変動や吸光係数変化の影響を受け易いなどの課題が指摘されている。

三井造船では、蛍光寿命を計測することにより、これらの変動の影響を受けずにFRET評価ができる蛍光寿命フローサイトメータの開発と検証を進めてきた。今回、細胞のがん化に密接に関わっている細胞内タンパク質のMEKとERKの結合や解離を検出できるFRETプローブを細胞内に発現させ、これに対するMEK阻害剤の濃度依存的薬剤応答が従来の蛍光強度比法よりも高精度で検出できることを確認した。このアッセイ系は、創薬現場において抗がん剤のスクリーニングに有用であると考えられる。

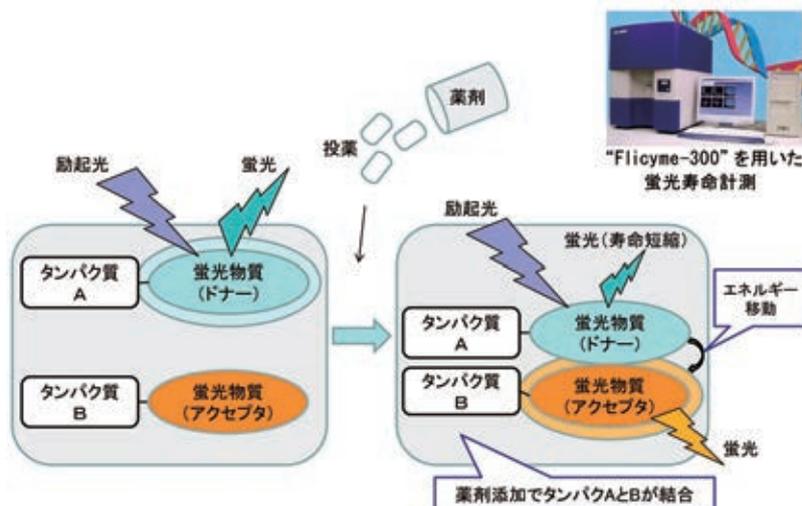


図1 生細胞内 FRET による薬剤応答評価の概念
Concept of Evaluation for Dose Response by FRET in Living Cell

* 技術本部 玉野技術開発センター

** 技術本部 技術総括部

1. はじめに

1.1 生細胞内 FRET による薬剤応答評価の必要性

現在の医療において、悪性腫瘍の治療は人々の QOL (Quality of Life, ヒトや生活の質) 向上のための重要課題の一つに挙げられる。この悪性腫瘍に対する薬は、これまで細胞毒性を指標として開発されたため、核酸やタンパク質の合成経路、DNA や微小管といった細胞増殖に関わる生体高分子を標的としていた。そのため、細胞増殖の盛んな骨髄造血細胞や小腸上皮細胞等で副作用が生じやすいという問題点があった。

近年、これらの副作用を軽減する薬として、悪性腫瘍細胞のみを標的とした“分子標的薬”と呼ばれる薬の開発が進んでいる。分子標的薬とは、疾患に関与する遺伝子やタンパク質などの遺伝子産物を標的として特異性を持って作用する薬剤である。疾病に関連した標的分子のみに作用することが可能であるため、既存の薬剤の副作用発現率を低下させることが期待される。

これらの分子標的薬の創薬プロセスでは、疾患の原因となる標的タンパク質が同定され、そのタンパク質の折りたたみ構造や活性部位の特定、構造解析、酵素活性、キネティクス、分子結合などの分子レベルの機能解析がなされる。

また、タンパク質分子レベルでの解析のみならず、細胞レベル、動物個体レベルでの形態から分子病態までの解析が統合的に進められる。この内、動物実験による個体レベルでの薬物評価は必須とされているが、動物愛護の観点から必要最小限の動物が使用されるべきとの声が高まっている中で、生体に近い条件での反応が期待できる細胞レベルでの解析に期待がかけられつつある。最近では、多くの製薬会社が細胞株や初代培養細胞を用いて細胞レベルでの評価を行うようになってきている。

細胞レベルでの評価系としては、簡易な系として細胞増殖数を計る方法、あるいは細胞の生死を判定するなどの方法が一般的であるが、近年の技術進歩に伴い、生細胞の中で疾病に関連した標的分子の結合・解離を評価できる蛍光共鳴エネルギー移動現象 (Förster Resonance Energy Transfer: FRET) を利用した生細胞内 FRET 法^{(1), (2), (3)}が注目され、普及しつつある。しかし、現時点では、薬剤濃度と関連付けて FRET を計測した実例は少ない。

1.2 生細胞内 FRET の課題

FRET とは、2つの蛍光物質が 10 nm 以下の近接する位置に存在し、片方の蛍光物質 (ドナー蛍光色素) の蛍光スペクトルがもう片方の蛍光物質 (アクセプタ蛍光色素) の吸収スペクトルに重なる時、ドナー蛍光色素に対して励起光を照射するとその励起エネルギーがアクセプタ蛍光色素に転移してアクセプタ蛍光色素が蛍光を発する現象である⁽¹⁾。注目している 2つの標的タンパク質に FRET 発生条件を満たす 2種の蛍光物質である蛍光タンパク質をそれぞれ標識した状態で、標的タンパク質が分子間結合すると、蛍光タンパク質同士も近接して FRET が発生する (図 1)。

FRET が発生する標的タンパク質と蛍光タンパク質の組合せを FRET プロープと呼ぶが、これらプロープには、分

子内 FRET プロープと分子間 FRET プロープが知られる (図 2)。分子内 FRET プロープは、標的タンパク質とドナー蛍光タンパク質、アクセプタ蛍光タンパク質が 1つの分子内に組み込まれており、標的タンパク質の結合によって FRET が発生する。代表例として、蛍光カルシウム指示薬 Cameleon^{(1), (4)}、Ras や Raf 遺伝子配列を組み込んだ Raichu⁽²⁾ などが知られる。

一方、分子間 FRET プロープは 2つの標的タンパク質が別個の分子としてそれぞれ蛍光タンパク質が標識された構成となっており、標的タンパク質同士の結合により FRET が発生する。

分子内 FRET プロープは、その構造上、ドナー、アクセプタ蛍光タンパク質の細胞内での分子数を 1:1 に規定できるため、ドナーとアクセプタの蛍光強度の比を指標にすることにより、比較的良好なデータが得られるメリットはあるが、標的タンパク質同士が結合できるように、折りたたみ構造をとるための連結部 (リンカー) を試行錯誤する必要があるなど、プロープの製作に手間がかかる課題がある。一方、分子間 FRET プロープは、プロープの製作が簡便で応用範囲も広いが、ドナーとアクセプタ蛍光タンパク質の細胞内での分子数を 1:1 にすることが困難であり^{(1), (4)}、サンプルの調整ごとにその比率が変動する。この分子数比の変動は、ドナー、アクセプタ蛍光強度に直接影響を及ぼすため、従来の蛍光強度をベースにした評価には課題があると言われている。

1.3 蛍光寿命フローサイトメータの特長

三井造船は、蛍光強度と同時に蛍光寿命が計測可能なフローサイトメトリ装置 “Flicyme-300” を開発し、高速かつ正確に FRET を評価できることを報告してきた^{(5), (6)}。ドナーからアクセプターにエネルギーが移動するとドナーの蛍光寿命が短縮することが知られており、これを利用するものである。蛍光寿命は、ドナー、アクセプタの分子数に依存しないため、信頼性の高い評価が可能とされている^{(1), (7)~(9)}。

これまで評価が困難と言われている分子間 FRET に関して、細胞のがん化に関わる Ras シグナル伝達の下流に位置する細胞内タンパク質の MEK と ERK の結合や解離を検出

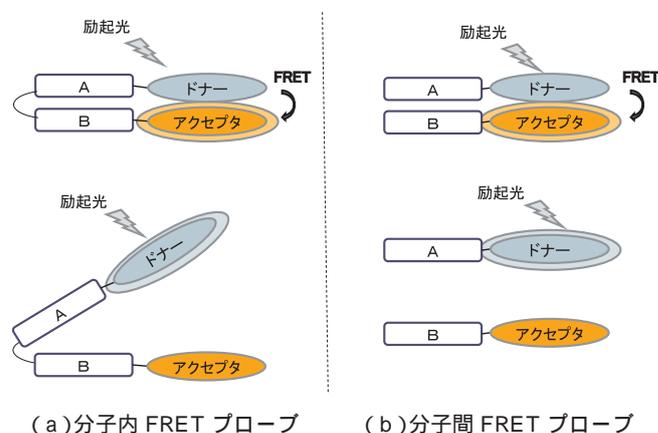


図 2 分子内 FRET プロープと分子間 FRET プロープのメカニズムの違い
Intramolecular FRET Probe and Intermolecular FRET Probe

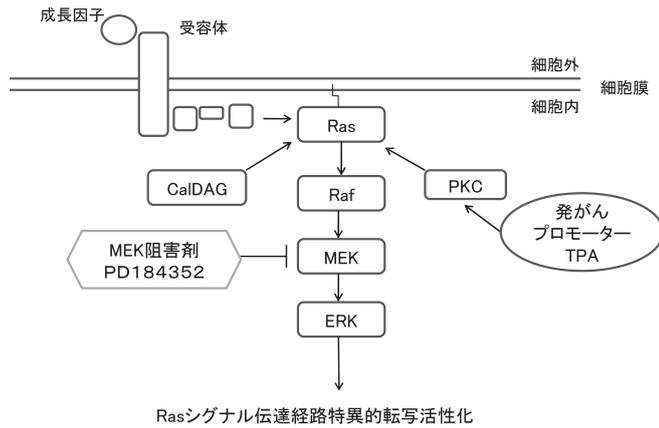


図3 Rasシグナル伝達経路
Ras Signaling Pathway

する FRET プローブを試作し、これに対する MEK 阻害剤の薬剤濃度依存的応答が従来の蛍光強度比法よりも高精度で検出されることを確認した。細胞内 FRET に対する薬剤応答反応を精度よく評価できたことから、このアッセイ系は、創薬現場において抗がん剤のスクリーニングに有用であると考えられる。

2. がん関連シングル伝達系を用いた実証

細胞内シグナル伝達経路の中で Ras シグナル伝達経路は、現在までにその作用機構が解明されている。Ras シグナル伝達経路における細胞外からの伝達物質としては、主に EGF (上皮成長因子), FGF (繊維芽細胞成長因子), PDGF (血小板成長因子) が知られる。これらの伝達物質は、それぞれ細胞膜に局在する EGFR (EGF 受容体), FGFR (FGF 受容体), PDGFR (PDGF 受容体) と特異的に結合する。受容体は細胞膜を貫通する形態で存在しており、細胞外領域にて伝達物質と結合するとその結合に応じて受容体が活性化する。この受容体活性化を細胞内タンパク質が感知してシグナル伝達活性化の連鎖反応が進み、Ras が活性化状態になる。Ras の活性化には CalDAG-GEF (別名 RASGRP2 (Ras Guanyl Releasing Protein)) も関与することが知られている^{10),11)}。Ras の活性化シグナルは、Raf を介して MEK へと伝達される。MEK は通常 ERK と結合状態にあるが、MEK が活性化状態になると、ERK と解離する。解離した ERK は細胞核の内部へ移行して、遺伝子発現の調節に働く(図3)¹²⁾。

Ras シグナル伝達経路は、このように細胞外からのシグナルを細胞核へ伝達させる機能を持ち、細胞の増殖や細胞分裂、分化、生存に関連することが知られている。また、Ras シグナル伝達経路の異常制御によって、細胞が腫瘍化することが知られている。Ras の活性化変異体はヒトの全腫瘍のうち約 25% の確率で確認されている。特に、早期発見が非常に困難な上に進行が早く、きわめて予後が悪いとされるすい臓がんでは、90% にも上る確率で確認されているなど^{12),13)}、腫瘍形成において Ras シグナル伝達経路の重要性が示されている。

このようなシグナル伝達経路のタンパク質間相互作用の計測には、アフィニティークロマトグラフィや SPR 法、プロテインアレイ、免疫沈降法、あるいは酵母内で相互作用因子を検出する解析手法などが使用されている。これらの方法に共通する問題点は、生きた細胞の中でタンパク質の相互作用をリアルタイムに検出できないことである。そのため、時系列でタンパク質の相互作用を確認する場合には、特定の時系列で細胞をすりつぶし、それぞれの調整サンプルで解析を行う必要がある。一方、細胞内 FRET 法を用いることで、生きた細胞の中でタンパク質の相互作用をリアルタイムに検出することが可能となりつつある。

本報では、がんなど腫瘍形成に重要な役割を持つ Ras シグナル伝達内の MEK と ERK の相互作用に対する薬剤の影響を生細胞の中で検出することを試みた。

3. 実証試験

3.1 試験概要

3.1.1 ベクターの調整

MEK, ERK, CalDAG の各遺伝子¹¹⁾については、京都大学松田道行教授から提供を受けたものを用いた。蛍光タンパク質発現遺伝子は Amalgam 有限会社製を使用し、ドナー蛍光タンパク質として単量体 Azami Green407 (以下, mAG407) を、アクセプタ蛍光タンパク質として単量体 Kusabira Orange (以下, mKO) を選択した。MEK 遺伝子の 3 側に mAG407 あるいは mKO 遺伝子をつなげたもの、ERK 遺伝子の 5 側あるいは 3 側に、mAG407 あるいは mKO 遺伝子をつなげたものをそれぞれ CMV プロモータを有する発現ベクターのマルチクローニングサイトに挿入した。CalDAG 遺伝子については、CAG プロモーター下流に挿入した発現ベクターを用いた。

3.1.2 23F 細胞の培養と遺伝子導入

本解析においては、浮遊旋回培養を行うことが可能な 293F 細胞を用いた。培地は、293F 細胞培養用のフリースタイル 293 培地を用いた。遺伝子導入には 293fectin を用いた。これらは、いずれも米国 Life Technologies 社のものである。遺伝子導入は MEK 遺伝子, ERK 遺伝子, CalDAG 遺伝子を含むベクターをそれぞれ 0.3 μg ずつ計 2.1 μg 導入した。遺伝子導入約 48 時間後に細胞を回収し、フリースタイル 293 培地で希釈したサンプルについて計測を行った。

3.1.3 計測と解析

計測に使用した“Flicyme-300”の仕様を表1に示す。計測されたデータは FlowJo (トミーデジタルバイオロジー株式会社製) で解析を行った。ドナー Ch 蛍光強度 (FL1) とアクセプタ Ch 蛍光強度 (FL2) で展開した 2 次元プロット情報の内、FRET プローブが正常に発現している FL1-FL2 蛍光強度の強い細胞集団を選択し、この細胞集団の蛍光寿命値の中央値を蛍光寿命代表値とした。FRET 効率 E は、FRET 発生時のドナー蛍光寿命 $_{DFRET}$ と FRET 非発生時のドナー蛍光寿命 $_{DnFRET}$ を用いて式(1)から算出した^{1),7)-9)}。

$$E = 1 - \frac{_{DFRET}}{_{DnFRET}} \dots\dots\dots(1)$$

表1 “Flicyme-300”の仕様
Specifications of “Flicyme-300”

光源	レーザーダイオード 407 nm, 60 mW
検出パラメータ	散乱光 2 Ch 蛍光強度 3 Ch 蛍光寿命 3 Ch
検出器	前方散乱光: フォトダイオード 側方散乱光: 光電子増倍管(PMT) 蛍光: (PMT)
検出波長帯	482/35 nm (mAG407) 579/34 nm (mKO) 650 ロングパス
サンプル流速	6 m/s
サンプル流量	低速: 40 μ /min 中速: 80 μ /min 高速: 160 μ /min
最大イベントレート	10 000 イベント /s
変調周波数	28 MHz
装置サイズ	500(W) × 675(D) × 700(H)

表2 最適な FRET プローブ組み合わせの選定
Selection for Best Matching FRET Probe Pair

MEK 側	ERK 側	FRET 効率
MEK-mKO	mAG407-ERK	4.49%
	ERK-mAG407	2.18%
MEK-mAG407	mKO-ERK	2.18%
	ERK-mKO	0.72%

3.2 最適組み合わせの選定

本試験に当たり、最適な FRET ペアを求める試験を行った。まず、MEK 遺伝子の 3 側に mAG407 あるいは mKO 蛍光タンパク質を標識したものの 2 種類 (MEK-mAG407, MEK-mKO) と、ERK 遺伝子の 5 側に 3 側に、それぞれ mAG407 あるいは mKO 遺伝子をつなげたものの 4 種類 (ERK-mAG407, ERK-mKO, mAG407-ERK, mKO-ERK) の内、どの組み合わせが最も高い FRET 効率を示すかを確認した。その結果、表 2 に示すように、ドナー mAG407-ERK とアクセプタ MEK-mKO の組み合わせが最も高い FRET 効率 4.49% を示したほか、ドナー ERK-mAG407 とアクセプタ MEK-mKO の組み合わせが FRET 効率 2.18% の値を示した。そこで、これら 2 つの組み合わせの FRET ペアを以降の試験に用いることとした。

3.3 薬剤応答試験結果

MEK の選択的阻害剤である PD184352 (CI-1040) (以下、阻害剤) は、タンパク質分子としての試験 (In Vitro) での絶対阻害定数 K_i は 300 nM、細胞株を用いた 50% 阻害濃度 IC_{50} は 100-500nM であることが示されている¹⁴⁾⁻¹⁶⁾。この IC_{50} は阻害剤の有効性を示す値として用いられる。

本試験では、FRET プローブ導入細胞に対して阻害剤濃度別に添加したサンプルの蛍光寿命変化を追った。

表3 TPA 添加による MEK-ERK 相互作用への効果
Effect of TPA on the Interaction of MEK-ERK Protein

No.	MEK 側	ERK 側	TPA	FRET 効率
No.1	MEK-mKO	mAG407-xERK	無し	5.80%
			有り	4.12%
No.2	MEK-mKO	ERK-mAG407	無し	5.10%
			有り	2.74%

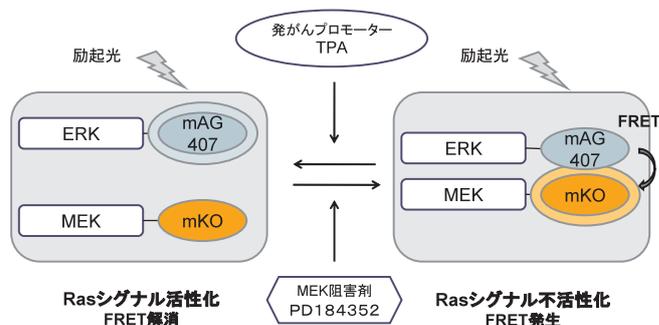


図 MEK-ERK 分子間 FRET プローブの “Flicyme-300” による計測
Measurement of Intermolecular FRET Probes Composed of MEK-ERK Protein with “Flicyme-300”

まず、MEK-mKO と mAG407-ERK のみを発現させた細胞に阻害剤を添加しても蛍光寿命の変動は確認されなかった。そこで、Ras シグナル伝達経路を活性化させることが知られる TPA (12-O-Tetradecanoylphorbol-13-acetate) を最終濃度 100 nM で添加すると共に、MEK の上流に位置する Ras に対する GEF (Guanine Nucleotide Exchange Factor) である CalDAG 遺伝子を発現させた。このように Ras シグナル伝達系を活性化状態にすると MEK と ERK も活性化され、細胞内での MEK と ERK の解離が促進する。ここに阻害剤を添加すると、より高濃度条件下で MEK の活性化が阻害され、MEK と ERK が結合すると考えられる (図 3, 図 4)。この時の蛍光寿命の変動を解析した。

3.3.1 TPA に対する FRET 効率変動

FRET プローブの組み合わせとして、MEK-mKO と mAG407-ERK, MEK-mKO と ERK-mAG407 のどちらの組み合わせが顕著な薬剤応答性を示すかを確認した。

CalDAG 遺伝子を追加導入し、TPA を 100 nM 添加した時の FRET 変動幅を確認した結果、表 3 に示すように、MEK-mKO と mAG407-ERK の組み合わせでは TPA 非添加時の FRET 効率が 5.80%、TPA 添加時の FRET 効率が 4.12% であり、TPA 刺激によって 1.68% FRET 効率が減少した。一方、MEK-mKO と ERK-mAG407 の組み合わせでは TPA 非添加時の FRET 効率が 5.10%、TPA 添加時の FRET 効率が 2.74% であり、TPA 刺激によって 2.36% FRET 効率が減少した。この結果から、TPA 刺激に対する FRET 解消率は MEK-mKO と ERK-mAG407 の組み合わせがより顕著であることから、以降の試験にはこの組み合わせの FRET プローブを用いることとした。

3.3.2 濃度依存的な蛍光寿命の変動

MEK-mKO, ERK-mAG407 及び CalDAG 遺伝子を等比率で導入した細胞に, TPA を 100 nM 添加したサンプルに対し, 阻害剤を 0 ~ 10 000 nM の濃度幅で添加した. 図 5 に示すように, 10 倍希釈系列で薬剤を添加した結果, 10 ~ 1 000 nM の濃度幅で蛍光寿命が最大約 0.06 ns 減少することが確認された. 一方, ERK-mAG407 のみを導入した場合の FRET ペアのないネガティブサンプルでは, 阻害剤を添加しても蛍光寿命の変動はほとんど観察されなかった(図 6). なお, 図 5 では, 阻害剤を 10 000 nM 添加すると, 蛍光寿命が 1 000 nM 添加時の蛍光寿命よりも増加することが示された. ERK-mAG407 のみを導入した細胞ではこのような変化は認められなかったことから, 何らかの特異的反応が検出されたものと考えられる. また, 光電子増倍管(Photomultiplier Tube : PMT)の加速電圧(ゲイン)を 0.5 V , 0.6 V , 0.7 V の

条件に変動させても蛍光寿命値の変動傾向に大きな差はみられなかった.

次に, 阻害剤の濃度を 2 倍希釈系列で添加した結果を, 図 7 に示す. これより, 12.5 nM ~ 400 nM の幅で蛍光寿命値が約 0.07 ns 連続的に変化していることが示された. 400 ~ 6 400 nM の濃度では, 蛍光寿命値の変動が観察されなかったことから, FRET 反応が飽和していると考えられた. 12 800 ~ 25 600 nM の濃度では図 5 の結果と同様, 蛍光寿命値が逆に増加することが示された. PMT の加速電圧を 0.5 V , 0.6 V , 0.7 V の条件に変動させても図 5 の結果と同様に, 蛍光寿命値の変動傾向に大きな差はみられなかった.

3.3.3 蛍光寿命変動と蛍光強度比変動の比較

FRET 評価は, ドナー蛍光タンパク質とアクセプタ蛍光タンパク質の蛍光強度比を用いて評価がなされることが一般的である. 分子内 FRET プロブではドナーとアクセプタ発現量比率を厳密に 1 : 1 に制御することが可能であるため, 蛍光強度比を用いても, ある程度の補正で FRET の評価が可能である. しかし, 分子間 FRET プロブではドナーとアクセプタの発現量比率を厳密に 1 : 1 に制御することが困難であるため, 蛍光強度比を判定する時にその補正が困難であるとされている. そこで, 分子間 FRET プロブ評価の妥当性を実証するため, 10 倍希釈系列での計測データについて, 蛍光強度比で評価した結果を図 8 に示す. 図 8 に示すように, 蛍光強度比の分散は, 蛍光寿命の分散と比べて非常に広いことが示された. 同様に, 2 倍希釈系列での計測データについても蛍光強度比で解析した結果, 蛍光寿命値の変動に比べて蛍光強度比の変動は安定しておらず, 蛍光強度比による薬剤応答の評価が困難であることが示された(図). 原因としては, ドナー蛍光タンパク質とアクセプタ蛍光タンパク質が厳密に 1 : 1 の比率で発現していないこと, アクセプタ蛍光検出チャンネルへのドナー蛍光の漏れこみ, アクセプタ蛍光タンパク質の直接励起が原因として考えられる. また, PMT のゲインを 0.5 V , 0.6 V , 0.7 V に変えて 3 回試験を実施した結果,

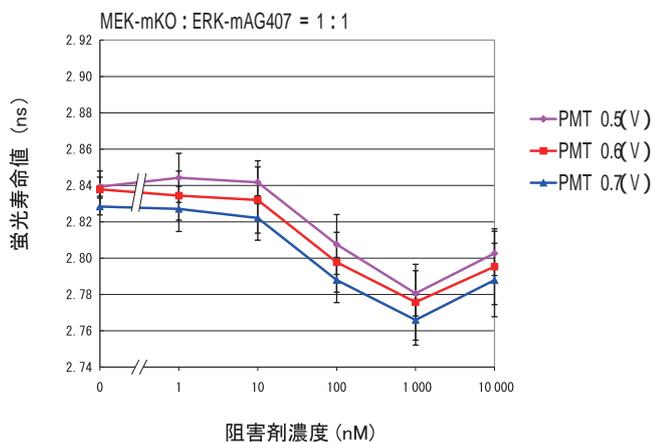


図 5 MEK 阻害剤の 10 倍希釈系列での蛍光寿命変化(1)
Variation of Donor Fluorescence Lifetime according to the Concentration Change of MEK inhibitor in 10times Dilution Series(1)

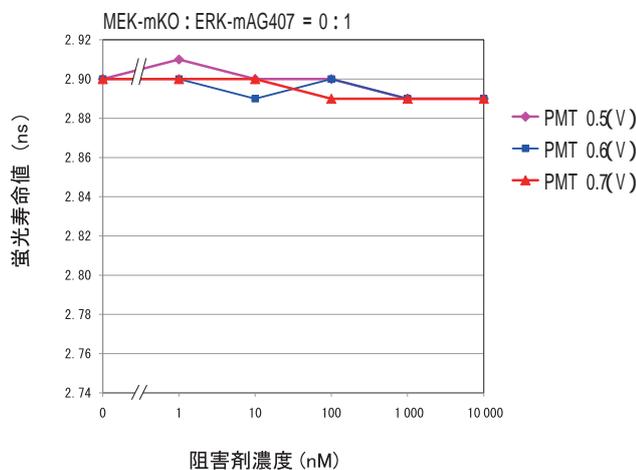


図 6 MEK 阻害剤の 10 倍希釈系列での蛍光寿命変化(2)
Variation of Donor Fluorescence Lifetime according to the Concentration Change of MEK inhibitor in 10times Dilution Series(2)

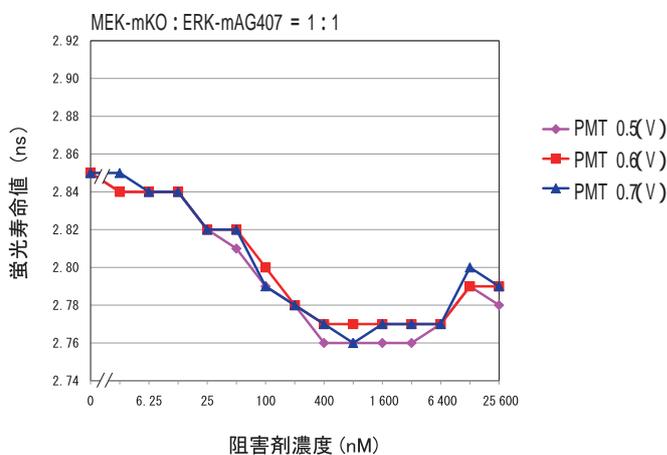


図 7 MEK 阻害剤の 2 倍希釈系列での蛍光寿命変化
Variation of Donor Fluorescence Lifetime according to the Concentration Change of MEK inhibitor in Doubling Dilution Series

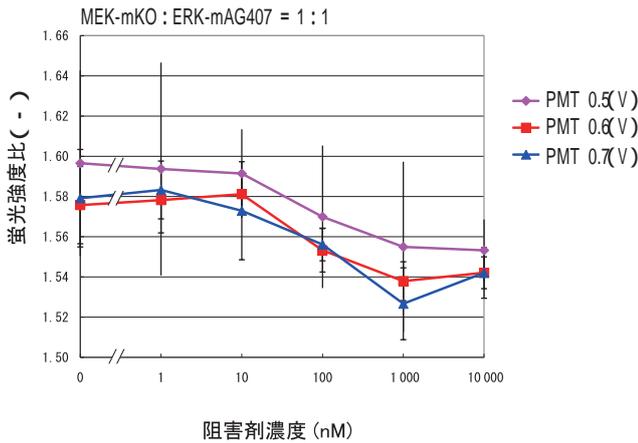


図8 MEK 阻害剤の10倍希釈系列での蛍光強度比変化
Variation of Donor/Acceptor Fluorescence Ratio according to the Concentration Change of MEK Inhibitor in 10times Dilution Series

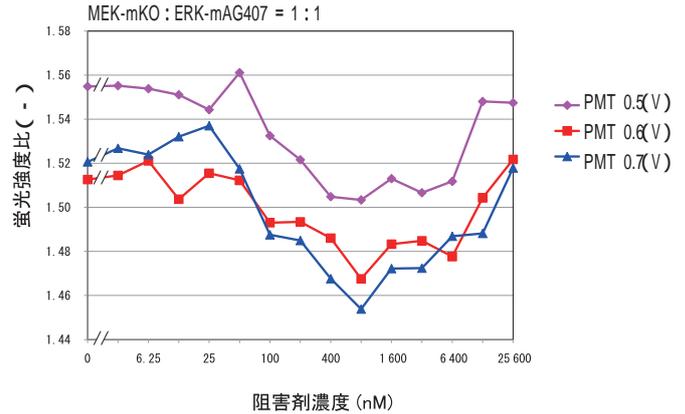


図9 MEK 阻害剤の2倍希釈系列での蛍光強度比変化
Variation of Donor/Acceptor Fluorescence Ratio according to the Concentration Change of MEK Inhibitor Doubling Dilution Series

蛍光強度比変動は大きくばらつくことが確認された。これらのことから、分子間 FRET プローブの評価には従来の蛍光強度比による評価法では困難であり、蛍光寿命で評価を行えば安定した評価を再現性良く行えることが確認できた。

3.3. 50%阻害濃度 (IC₅₀) の算出

図7の3.125 ~ 3200 nM の範囲のデータから最小自乗法によりシグモイド曲線近似を行ない、IC₅₀ を求めた。細胞内でのドナー蛍光分子の内 FRET が発生している分子の割合と“ Flicyme-300 ”が計測した蛍光寿命値 D の関係を求めると、式(2)となる。ここで、 D_{max} は蛍光寿命の最大値、 D_{min} は最小値である。阻害剤の各濃度 C_i nM での蛍光寿命値 D から実測 $FRET$ を求める。

$$\text{実測 } FRET(C_i) = \frac{D_{max} \left[1 - \frac{D_{min} \times A(C_i)}{D_{max} - D_{min}} \right]}{D_{max} - D_{min}} \dots\dots (2)$$

ここに、 $A(C_i) = \tan \left[\tan^{-1} \left(\frac{D(C_i) - D_{min}}{D_{max} - D_{min}} \right) \right]$,

$$= \tan^{-1} \left(\frac{D_{min} + D_{max} \times \tan^2 \left(\frac{D(C_i) - D_{min}}{D_{max} - D_{min}} \right)}{1 - \frac{D_{min} + D_{max} \times \tan^2 \left(\frac{D(C_i) - D_{min}}{D_{max} - D_{min}} \right)}{2}} \right),$$

$$= 2 \cdot f \quad f: \text{レーザの変調周波数}$$

また、シグモイド曲線の式から、予測 $FRET$ は式(3)より求める。

$$\text{予測 } FRET(C_i) = \frac{FRET(3.125) - FRET(3200)}{1 + e^{-(\log C_i - \log IC_{50})}} + FRET(3200) \dots\dots (3)$$

ここで、 IC_{50} は傾きを示す。

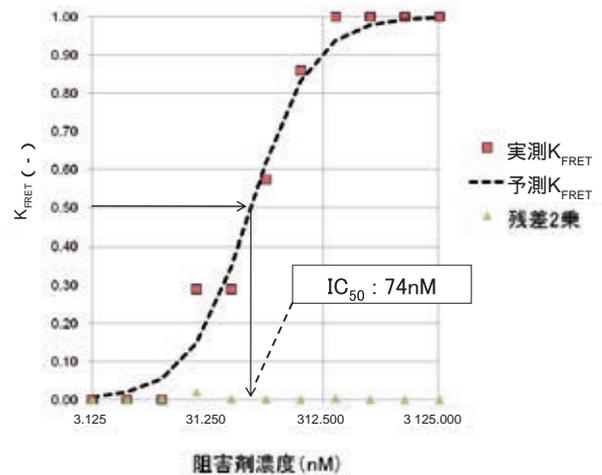


図10 蛍光寿命変動から得られたシグモイド曲線近似
Fitting Sigmoid Dose Response Curve from Fluorescence Lifetime Variation

予測 $FRET$ と実測 $FRET$ の残差 2 乗が最小となる IC_{50} を求めた。その結果、 IC_{50} は図10に示したとおり 74 nM となり、蛍光寿命を用いた算出が可能であることを示すことができた。

おわりに

腫瘍形成に関連の強い細胞内タンパク質の ERK と MEK の相互作用に対する MEK 阻害剤の薬剤濃度依存的応答が、蛍光寿命計測を用いることにより、従来評価が困難とされてきた分子間 FRET プローブにおいても安定的に評価可能であることが実証できた。

この評価系は今後、がん細胞に特異的に作用する分子標的薬の開発など創薬の現場で行われている細胞株や初代培養細胞を用いた細胞レベルでの薬効評価にも有用であると考えられる。

細胞シグナル伝達応答を検出する試薬としては、カルシウム

ム濃度変動を検出する Fluo-4 等の蛍光指示薬が創薬開発で使用されているが、非特異的反応が多く、偽陽性をスクリーニングする可能性があるとの意見もある。特異的反応を検出するには、シグナル伝達経路の標的分子を選定して、その細胞内応答を検出するのが望ましく、分子間 FRET プローブはこのような特異的スクリーニングに有用であると考えられる。また、分子間 FRET プローブは、分子内 FRET プローブに比べると設計や遺伝子組み換えが容易であり手軽に作製できる。今後、それぞれのシグナル伝達経路タンパク質をターゲットとした分子間 FRET プローブが作製され、“Flicyme-300”が創薬の高効率スクリーニングに貢献できることが期待できる。

最後に、計測を行うにあたり、FRET プローブ遺伝子を提供して頂いた京都大学医学研究科 松田道行教授に感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) A. Miyawaki : Monitoring Protein Conformations and Interactions by Fluorescence Resonance Energy Transfer between Mutants of Green Fluorescent Protein, *Methods In Enzymology*, 327(2000), p. 472
- 2) N. Mochizuki : Spatio-temporal Images of Growth-factor-induced Activation of Ras and Rap1, *Nature*, 411(2001), p. 1065
- 3) M. Fehr : Development and use of fluorescent nanosensors for metabolite imaging in living cells, *Current Opinion in Structural Biology*, 11(2001) p. 573
- 4) A. Miyawaki : Fluorescent indicators for Ca²⁺ based on green fluorescent proteins and calmodulin, *Nature*, 388(1997), p. 882
- 5) 中田 . ほか : 蛍光寿命 FRET フローサイトメトリー装置の開発, *三井造船技報*, 190(2007), p. 54
- 6) 星島 . ほか : 2 種類のタンパク質相互作用を同時に計測するフローサイトメトリー装置の開発, *三井造船技報*, 196(2009), p. 38
- 7) R. B. Sekar : Fluorescence resonance energy transfer (FRET) microscopy imaging of live cell protein localizations, *Journal of Cell Biology*, 160 (2003), p. 629
- 8) H. Wallrabe : Imaging protein molecules using

FRET and FLIM microscopy, *Current Opinion in Biotechnology*, 16(2005), p. 19

- 9) K.Suhling : Time-resolved Fluorescence Microscopy, *Photochemical & Photobiological Sciences*, 4 (2005), p. 13
- 10) J. L. Bos : All in the family? New insights and questions regarding interconnectivity of Ras, Rap1 and Ral, *The EMBO journal*, 17(1998), p. 6776
- 11) S. Yamashita : Ca/DAG-GEFIII Activation of Ras, R-Ras, and Rap1, *The journal of Biological Chemistry*, 275(2000), p. 25488
- 12) Downward J : Targeting RAS signalling pathways in cancer therapy, *Nature Reviews Cancer*, 3(2003), p. 11
- 13) C. Tsatsanis : The role of oncogenic kinases in human cancer, *International Journal of Molecular Medicine*, 5(2000), p. 583
- 14) J. S. Sebolt-Leopold : Blockade of the MAP kinase pathway suppresses growth of colon tumors in vivo, *Nature Medicine*, 5(1999), p. 736
- 15) D. B. Solit : BRAF mutation predicts sensitivity to MEK inhibition, *Nature*, 439(2006), p. 358
- 16) R. R. Mattingly : The Mitogen-Activated Protein Kinase/Extracellular Signal-Regulated Kinase Kinase Inhibitor PD184352 (CI-1040) Selectively Induces Apoptosis in Malignant Schwannoma Cell Lines, *The Journal of Pharmacology and Experimental Therapeutics*, 316(2006), p. 456

〔問い合わせ先〕

技術本部 玉野技術開発センター
TEL 0863 - 23 - 3021 山口 卓二



山口 卓二 林 弘能 伊藤 彰英 中田 成幸

西大津 BP 藤尾奥町高架橋鋼上部工事 - 狭あいな場所での桁架設 -



写真1 完成時全景(手前は既設橋)



写真2 架設状況

国道161号は、滋賀県琵琶湖西岸を南北に縦断し、京阪神と北陸を結ぶ重要な幹線道路である。しかし、近年の輸送車両の大型化や自動車交通量の急激な増加により、その機能は著しく低下してきている。このような問題を解消するため、西大津バイパス(大津市坂本本町から大津市横木一丁目までの11.0 km 区間)の4車線化工事が進められおり、藤尾奥町高架橋はその工事の一環である。

三井造船は、平成21年8月に本工事を国土交通省近畿地方整備局滋賀国道事務所より受注し、上り線となる新設橋及び合成床版の工場製作、現地架設を行った。また、下り線の既設橋においては、高力ボルト取替、耐震補強用の落橋防止構造の設置を行い、平成22年9月竣工、引き渡しを行った。

特長

(1)狭あいな場所での桁架設

新設橋は、並走する既設橋、近接する民家、橋梁下を走る市道などから狭あいな場所での架設条件となり、クレーンやベント設置位置の制限が厳しいことから、大ブロック架設や張出架設にて施工する必要があった。これにより、仮組時とは異なった変形状態となるため、別途解析を実施し、各架設ステップの変位値と合わせながら架設することにより、精度よく架設を行うことができた。

(2)合成床版の製作

新設橋の合成床版は、“MESLAB¹⁾”を使用した。また、底鋼板とCT形鋼及びL形鋼の溶接は、初めてロボット溶接による施工を行った。トーチ角度や電圧など、“MESLAB”に適した溶接条件を検討し、製作性及び品質が高い合成床版を製作することができた。

(3)高力ボルト取替

既設橋は昭和48年に完成した単純合成桁7連である。高力ボルトに現在は使われていないF11Tを使用している

ことから、遅れ破壊する危険性を有していたため、その調査とボルト取替を実施した。調査方法は目視点検、たたき点検、超音波探傷による点検であり、取替方法は照査を基に1本ずつボルトを取り替えることとし、安全に施工することができた。

(4)落橋防止構造の設置

既設橋の耐震性向上のため、落橋防止構造を設置した。既設橋は単純合成桁7連で構成されていることから、PC桁連結ケーブルによる落橋防止装置、地震時の変位を抑制する変位制限装置を各橋脚上に設置した。

主要目

工事名：西大津 BP 藤尾奥町高架橋鋼上部工事

工事場所：滋賀県大津市藤尾奥町地先

< 新設橋諸元 >

橋梁形式：鋼5径間連続合成少数鉄桁橋

床版形式：合成床版 t = 240 mm

橋長：208.4 m、支間長：44.2 m + 3 × 39.0 m + 45.6 m

幅員：9.4 m(有効幅員：8.5 m)

主要鋼材：SM520C-H, SM490Y, SM400, SS400, S10T

鋼重：395 t

参考文献

1) 当社ホームページ：橋梁用 鋼・コンクリート合成床版 (MESLAB), http://www.mes.co.jp/business/infra/infra_03.html(2010-12-22)

(鉄構・物流事業本部)

〔問い合わせ先〕

鉄構運搬機工場 鉄構設計部

TEL 097 - 593 - 3773 太田 真二

水郷大橋工事に用いた鋼製函体製作工事 - 組替え可能な河川内仮締切用鋼製函体の製作 -



写真1 鋼製函体ユニット



写真2 組立状況

株式会社大本組より受注した水郷大橋工事に用いた鋼製函体全126ユニット(装備品含む)を、三井造船大分鉄構運搬機工場にて製作、当社千葉事業所内にて塗装完了の後、平成22年11月22日に引き渡した。

本函体群は、河川内橋脚の耐震補強工事用の仮締切設備として使用される。補強対象に合わせてユニットを組み替えて使用され、全126ユニット中、P2橋脚施工時は126ユニット、P3橋脚施工時は70ユニット、P4橋脚施工時は60ユニットを使用する。なお、ここで採用された工法は、NDR工法(Neo-Dry Repair Method)である。

本函体群は引き渡し後、平成22年12月1日より順次輸送が開始され、水郷大橋近傍の組立ヤードにおいて函体の大組立、進水、設置場所への曳航、パラスト注水、所定の位置に沈設、据付、仮締切内の水替えを行い、橋脚周辺にドライな作業空間が構築される。

この鋼製函体は、「水郷大橋下部耐震補強その1工事」(平成22年11月22日開始)にて使用される予定である。

特長

- (1) 止水性能を確保するために、「函体接合面の平坦度管理」及び「水みち防止のための溶接部の品質管理」を実施した。
- (2) 組み替え可能となる「各組み合わせ時の函体取り合い」及び「各組み合わせ時の各種装備品の配置」を確認した。
- (3) 通常の寸法計測、溶接外観検査に加え、気密試験を実施し、ユニット単体としても十分な止水性能を有していることを確認した。

主要目

工事名：水郷大橋工事に用いた鋼製函体製作工事

発注者：株式会社大本組

(元発注者：国土交通省関東地方整備局千葉国道事務所)

製品用途：「水郷大橋下部耐震補強その1工事」施工のための河川内橋脚工事に用いた仮締切設備

使用場所：千葉県香取市佐原地先

鋼製函体：全126ユニット

総重量 330 t

装備品：ガイドローラ(24基)

引き込みガイド(14組)

ガイドピン及びガイドリング

注排水バルブ及びエアバルブ

工事範囲：函体の製作、塗装

装備品の製作、塗装

工期：平成22年4月26日～平成22年11月22日

NDR工法：五洋建設株式会社の商標登録

特許 3905069号

/ 乾式作業用およびその設置方法

(他16件の特許、意匠)

国土交通省 NETIS(新技術情報提供システム)

登録技術(KT-000080 A)

(鉄構・物流事業本部)

〔問い合わせ先〕

鉄構運搬機工場 鉄構設計部

TEL 097 - 593 - 3773 笠間 慈弘

浮島2期廃棄物埋立B護岸ケーソン製作その3工事
- ハイブリッドケーソン5函完成 -



写真1 工事概要(川崎港浮島地区)*1



写真2 ケーソン製作完了写真(当社千葉事業所)

概要

現在、羽田空港沖の川崎市川崎港(浮島地区)において廃棄物海面処分場の2期工事が進められている。これは一般廃棄物だけでなく、建設発生土等の最終処分地としても受け入れができる処分場をつくるプロジェクトである。埋立方法としては、ケーソン*2を護岸として囲いをつくり、この中に廃棄物を投入するというものである。三井造船は、このケーソンの製作工事を平成21年7月に川崎市港湾局から受注し、平成22年6月に当社千葉事業所6号岸壁にて引渡しを完了した。

なお、平成22年度はB護岸だけでなく、C護岸ケーソンの製作工事も受注し、現在、鋭意製作中である。当社は海に面した広大な敷地を有しており、今後もケーソンを含めた海洋構造物の製作を通じて、国内の港湾及び漁港施設の建設に貢献していく所存である。

特長

(1)受注したケーソンはハイブリッドケーソンと呼ばれ、ケーソンの各部材に鉄筋コンクリートと鋼材の合成部材(ハイブリッド部材)を用いた構造で、鋼材の特長である高強度・軽量性を活かして、耐久性の向上や工費縮減を図ることができるものである。

(2)発注者より東京湾岸壁渡しと規定されていることから、ケーソン本体は現地に近い岸壁をもつ当社千葉事業所で製作した。なお、ケーソンの内部鋼殻については、海洋鋼構造物の製作が得意な大分事業所にて製作した。それにより、品質の良い内部鋼殻が製作できたことで、本体も品質の高い施工が可能となり、発注者の満足できる製品を完成させることができた。

主要目

工事名称	: 浮島2期廃棄物埋立B護岸ケーソン その3工事
発注者	: 川崎市港湾局(神奈川県)
工事範囲	: B護岸ケーソン5函の製作
工期	: 平成21年7月~平成22年7月
高さ	: 15.00m
幅	: 6.00m/15.00m
長さ	: 20.00m
ケーソン重量	: 1444t(1函当り)
鋼殻重量	: 62t(1函当り)
材質	: SS400, SM490A, SM490B

(鉄構・物流事業本部)

*1: 川崎市港湾局ホームページ: [\(http://www.city.kawasaki.jp/20/20kityo/sinjitukou/dai2ki/3/seisaku5/5-4-4.html#no4\)](http://www.city.kawasaki.jp/20/20kityo/sinjitukou/dai2ki/3/seisaku5/5-4-4.html#no4)(2011-1-12)

*2: 防波堤などの水中構造物として使用される大型の箱のことで、「岸壁や防波堤で使う上側が空いた函状構造物」と土木用語辞典では定義されている。

【問い合わせ先】

鉄構運搬機工場 鉄構設計部
TEL 097-593-3062 中野 訓雄

風力発電研修施設建設工事完成
- 拡大する風力発電設備のメンテナンス強化に寄与 -



写真1 研修施設内の訓練用機器



写真2 研修施設外観

三井造船は、JA 三井リース株式会社より受注した日本風力開発株式会社グループのイオスエンジニアリング & サービス株式会社向け「風力発電研修施設」を引き渡した。

本施設は、国内で拡大している風力発電施設のメンテナンス体制の確立を目指すために建設された日本で初めての風力発電施設用のメンテナンス要員育成施設である。

風力発電施設のメンテナンスは、地上 60 m 以上の風車用タワーの上部にあるナセル(発電機等が収納された設備)の中で行われるが、この様な設備のメンテナンストレーニングを実施する施設が日本国内には存在しなかった。このため、今まではメンテナンス要員の代表を海外のトレーニングセンターに派遣し、その代表者が国内のメンテナンス要員の指導に当たっていたのが実情であった。

現在、日本には風力発電設備が約 1700 基程度稼働しており、今後も洋上風力発電などを含め、風力発電設備は増加していく傾向にある。その設置スピードに比してメンテナンス体制はこれから整備していく状況となっており、本施設の稼働がメンテナンス要員の育成や技術の向上に役立つものと期待されている。

当社は風力発電施設の建設を数多く手がけているが、今後も拡大の見込まれる風力発電市場に対して、機器メーカーとしての強みを活かして、陸上はもとより洋上風力も見据えている。また、今後の課題であるメンテナンス分野にも積極的な展開を図る所存である。

特長

- (1) 建屋内には、定格出力 1 500 kW 型風車のナセル部の実機が設置されるため、実際の動きも再現可能となっており、発電機・増速機の点検、潤滑油の給油など実践を模擬した訓練が可能である。
- (2) 研修室と実習室を並行設置し、間仕切り上部に常時実機を見られる空間構成と訓練室上部の大きなトップライトによる昼間照明不要の省エネ設計を採用した。
- (3) 卓越風を利用した積雪が低減できる屋根形状を採用した。

主要目

工 事 名：風力発電研修施設新築工事
 発 注 者：JA 三井リース株式会社
 納 期：平成 22 年 8 月 20 日
 製品用途：風力発電設備メンテナンス要員訓練
 設置場所：青森県上北郡六ヶ所村大字尾鮫字弥栄平 1-98
 規 模：敷地面積 2 010.67 m²
 建屋面積 441.51 m²

(鉄構・物流事業本部)

〔問い合わせ先〕

建設エンジニアリング部
 TEL 03 - 5202 - 3907 春日井 清秀

「三浦バイオマスセンター」(愛称:「MKE BIMA ステーション三浦」)が完成 - 地域の特性を生かしたバイオマス(農水産物残渣)の利活用に貢献 -



当社の100%子会社である三井造船環境エンジニアリング(略称:MKE)は、三浦地域資源ユーズ株式会社より受注した、し尿・浄化槽汚泥及び農水産物残渣を処理する「三浦バイオマスセンター」、愛称「MKE BIMA ステーション三浦」を引き渡しました。

本センターは、三浦市の衛生センターの老朽化に伴う建て替えであり、し尿・浄化槽汚泥だけでなく、三浦市の特産物である大根、スイカなどの農産物残渣(未利用バイオマス)や処理後の小魚など(廃棄物系バイオマス)の水産残渣と一緒に処理することが特長です。

また、処理の過程で生じるメタンガスを、施設を動かすためのエネルギーとして再利用し、堆肥化設備を備えて、堆肥を生産し、農家に利用してもらう資源循環型の施設となっています。

MKEは、し尿・浄化槽汚泥処理施設や汚泥再生処理センターに関し、40件以上の納入実績を有し、加えて施設建設後の運転管理についても高度な維持管理技術を有しております。

「MKE BIMA ステーション三浦」についても、今後15年間の運転管理を受託しております。

[担当] 三井造船環境エンジニアリング(株) 環境ソリューション事業本部 営業部 菅野 寛樹 電話: 03-3675-4052

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
川島 幸 司
速水 礼
大橋 弘 隆
長谷川 興 司
松本 正文
神田 伸 靖
馬場 茂 利

三井造船技報

第202号

2011年(平成23年)2月28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 技術本部
〒103-0027 東京都中央区日本橋1丁目3番16号
TEL 03-5202-3600

印刷 株式会社 三造ビジネスクリエイティブ
〒134-0088 東京都江戸川区西鵜西8丁目4番6号

三井造船株式会社

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

本社	〒103-0027	東京都中央区日本橋1丁目3番16号	TEL 03-5202-3147
鑑西センター	〒134-0088	東京都江戸川区西鑑西8丁目4番6号	TEL 03-3675-2819
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
岡山支店	〒700-0903	岡山市幸町8番29号(三井生命ビル)	TEL 086-233-4131
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
四国支店	〒760-0050	高松市亀井町5番地1(百十四ビル)	TEL 087-833-4111
松山営業所	〒790-0002	松山市二番町3丁目3番8号(伊予石油ビル)	TEL 089-947-7060
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	大分市日吉原3番地	TEL 097-593-3111
技術本部			
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
CAE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	〒103-0027	東京都中央区日本橋1丁目3番16号	TEL 03-5202-3600
海外事務所	シンガポール, 北京, 上海, 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(ニューヨーク)		

三井造船技報 第 202 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 - 5202 - 3610

三井造船株式会社 技報編集委員会 事務局 行(TEL. 03 - 5202 - 3600)

三井造船技報 送付先の確認と第 202 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

主要営業品目

船舶・艦艇事業本部 TEL 03-5202-3510 FAX 03-5202-3599

液化天然ガス（LNG）運搬船，液化石油ガス（LPG）運搬船，原油輸送船，石油精製品運搬船，ばら積貨物船，オープンハッチ型貨物船，鉾石運搬船，石炭運搬船，コンテナ船，自動車運搬船，FSO，FPSO，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，ホーバークラフト，高速カーフェリー，深海探査ロボット（AUV，ROV）
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
水中点検 / 作業ロボット，水中探査ロボットを用いた水中点検サービス

鉄構・物流事業本部 TEL 03-5202-3900 FAX 03-5202-3937

橋梁，ハイブリッド構造物（浮消波堤，浮消波堤，浮棧橋，浮体式係船岸，ケーソン），海洋構造物（シーパス，ケーソン，沈埋函，ジャケット），浮体式海洋設備，海外土木・建築工事全般，特殊構造物，風力発電設備工事
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

機械・システム事業本部 TEL 03-5202-3950 FAX 03-5202-3977

船用ディーゼル機関，ディーゼル発電プラント
プロセス用圧縮機（往復動式，軸流式，遠心式），蒸気タービン発電設備，炉頂圧回収タービン発電設備，一般機械装置
塔槽，熱交換器，反応器，回転式乾燥機，重合機，攪拌槽，LNG 船用熱交換器，PV 膜分離装置
ディーゼルコージェネレーション発電プラント，ガスタービンコージェネレーション設備，複合発電設備，ガスエンジン
省力化機器（清掃ロボットなど），センシング機器（地中埋設物・建築物探査レーダ，太陽追尾探光システム，複合材料剥離検査器），レーダ探査サービス，水理実験設備，訓練用シミュレータ
誘導加熱装置（パーヒータ，ピレットヒータ，ピンヒータ），薄板加熱装置，高周波電源装置（PWM インバータ，サイリスタインバータ，ゾーンコントロール用電源），銅管焼鈍装置，電磁プロセッシング応用機器（電磁攪拌，電磁モールド）
SiC ウェハー，CVD-SiC コーティング，スパッタリング用ターゲット材
LSS（ライフサイクルソリューションサービス：陸・船用ディーゼルエンジン，ガスタービン，各種ボイラ，プロセス用圧縮機，蒸気タービン発電設備，炉頂圧タービン発電設備，プロセス機器，誘導加熱装置，各種クレーンの保守，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）
低温ポリシリコン TFT 用イオン注入装置，ゾーンコントロールヒータ利用液晶・半導体加熱処理装置，FPD 用各種検査装置，その他半導体・液晶パネル用各種製造装置製造受託

環境・プラント事業本部 TEL 03-3675-6984 FAX 03-3675-6429

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，分離炉，分解ガスケンチャー，高粘度流体脱揮装置，PSA 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
原子燃料サイクル関連，放射性廃棄物処理関連
三井リサイクル 21（キルン式ガス化溶解システム），廃棄物処理関連（流動床式焼却炉，粗大ごみ処理施設，リサイクルセンター，加熱脱塩素化装置，ダイオキシン分解触媒，炭化炉），ガス処理関連（脱塩，集塵）
水処理関連（産業排水，汚泥），ガス処理関連（排煙脱硫，排煙脱硝，脱臭），廃棄物再資源化システム（焼酎廃液，有機性廃棄物からのメタン発酵，コンポスト及び乾燥装置），バイオガスプラント（生ごみ・汚泥バイオガスプラント，油温減圧乾燥式食品廃棄物再資源化システム，家畜糞尿再資源化システム）

事業開発本部 TEL 03-5202-3981 FAX 03-5202-3989

新規事業の発掘・立案・計画・事業化推進，全社の事業開発の統括・推進，社内向け事業開発関連情報の発信，新規事業のフィージビリティスタディ，新規事業のプロジェクトの推進
ガスハイドレートの製造・貯蔵・輸送・ガス化技術の開発，ガスハイドレートの特性を生かした各種事業開発，海底資源メタンハイドレートの探査・掘削技術の開発，PCB 処理プロジェクト
船舶運航支援のポータルサービス，フリートモニター

営業総括本部 TEL 03-5202-3940 FAX 03-5202-3125

CS（顧客満足）向上活動の推進，全社にかかわる営業戦略の企画・立案・推進，各事業本部の営業支援及び社内横断プロジェクトの推進，新規事業の発掘と事業化推進，国内・海外営業拠点（支社，支店，営業所，海外駐在員事務所）の統括と受注活動の推進
海外プロジェクトの推進（ODA 案件），海外新規案件の発掘及び支援



市原風力発電所
設計・施工・運営



風力発電研修施設
設計・施工



肥前南風力発電所
設計・施工

珠洲風力発電所
風車用タワー製造

ウインドパワーかみす
風車用タワー製造

平生風力発電所
風車用タワー製造

御前崎風力発電所
風車用タワー製造



(仮称)由良風力発電所
設計・施工



渥美風力発電所
設計・施工



鴨川風力発電所
設計・施工

日本中のCO₂を減らすのも 我々のつとめです!

三井造船は、持続可能な社会づくりの一翼を担う風力発電分野で活躍しています。

当社千葉事業所に大型風力発電所を設置以来、大型鋼構造物の製作や建設の経験を活かし、全国の風力発電所建設に取り組んできました。

三井造船グループは、今後も温室効果ガス削減に貢献していきます。